

教育部高职高专规划教材

电子测量与仪器

魏　中　主编
林训超　主审

化学工业出版社
教材出版中心

教育部高职高专规划教材

电子类专业

模拟电子技术	孙建设 主编
数字电子技术	张惠敏 主编
高频电子线路	莫怀忠 主编
电路分析	任尚清 主编
单片机应用技术	耿长清 主编
电视接收技术	王学力 主编
电子测量与仪器	魏　中 主编
电子设计自动化(EDA)技术	唐亚平 主编
电子技术实训	张惠敏 主编
C语言	邵士媛 主编

ISBN 7-5025-3942-5

9 787502 539429 >

ISBN 7-5025-3942-5/G・1093　定价：16.00元

教育部高职高专规划教材

电子测量与仪器

魏　中　主　编
蔡光祥　副主编
林训超　主　审

化学工业出版社
教材出版中心
·北　京·

（京）新登字 039 号

图书在版编目（CIP）数据

电子测量与仪器/魏中主编. —北京：化学工业出版社，2003.1

教育部高职高专规划教材

ISBN 7-5025-3942-5

Ⅰ. 电… Ⅱ. 魏… Ⅲ. ①电子测量-高等学校：技术学校-教材 ②电子测量设备-高等学校：技术学校-教材 Ⅳ. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2002）第 096276 号

教育部高职高专规划教材

电子测量与仪器

魏 中 主 编

蔡光祥 副主编

林训超 主 审

责任编辑：张建茹

责任校对：李 林

封面设计：郑小红

*

化学工业出版社
教材出版中心 出版发行

（北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029）

发行电话：（010）64982530

http://www.cip.com.cn

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 9½ 字数 229 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3942-5/G·1093

定 价：16.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者，本社发行部负责退换

内 容 提 要

本书介绍了电子测量的原理、方法以及电子测量仪器的基本组成和应用。内容包括：信号发生器、示波测量、频率与时间的测量、电压测量、频域测量、数据域测试、自动测量。

全书根据高职教育的特点，理论以够用为度，注重实际应用，各章配有实训参考方案，有较强的实用性。

本书通俗易懂，既可作为课堂教材又方便自学，适用于高职、高专、成教等电子类专业学生使用，也可供有关工程技术人员参考。

出 版 说 明

高职高专教材建设工作是整个高职高专教学工作中的重要组成部分。改革开放以来，在各级教育行政部门、有关学校和出版社的共同努力下，各地先后出版了一些高职高专教育教材。但从整体上看，具有高职高专教育特色的教材极其匮乏，不少院校尚在借用本科或中专教材，教材建设落后于高职高专教育的发展需要。为此，1999 年教育部组织制定了《高职高专教育专门课课程基本要求》（以下简称《基本要求》）和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》（以下简称《培养规格》），通过推荐、招标及遴选，组织了一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师，成立了“教育部高职高专规划教材”编写队伍，并在有关出版社的积极配合下，推出一批“教育部高职高专规划教材”。

“教育部高职高专规划教材”计划出版 500 种，用 5 年左右时间完成。这 500 种教材中，专门课（专业基础课、专业理论与专业能力课）教材将占很高的比例。专门课教材建设在很大程度上影响着高职高专教学质量。专门课教材是按照《培养规格》的要求，在对有关专业的人才培养模式和教学内容体系改革进行充分调查研究和论证的基础上，充分吸取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验和教学成果编写而成的。这套教材充分体现了高等职业教育的应用特色和能力本位，调整了新世纪人才必须具备的文化基础和技术基础，突出了人才的创新素质和创新能力的培养。在有关课程开发委员会组织下，专门课教材建设得到了举办高职高专教育的广大院校的积极支持。我们计划先用 2～3 年的时间，在继承原有高职高专和成人高等学校教材建设成果的基础上，充分汲取近几年来各类学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验，解决新形势下高职高专教育教材的有无问题；然后再用 2～3 年的时间，在《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上，通过研究、改革和建设，推出一大批教育部高职高专规划教材，从而形成优化配套的高职高专教育教材体系。

本套教材适用于各级各类举办高职高专教育的院校使用。希望各用书学校积极选用这批经过系统论证、严格审查、正式出版的规划教材，并组织本校教师以对事业的责任感对教材教学开展研究工作，不断推动规划教材建设工作的发展与提高。

教育部高等教育司

2001 年 4 月 3 日

前　言

为贯彻《教育部关于加强高职高专教育人才培养工作的意见》（教高［2000］2号）有关精神，积极支持教育部面向21世纪高职高专教材建设，在教育部领导直接关怀下，全国高等职业教育院校协作会专门课开发指导委员会确定了编写电子类专业的10门主干课程（《电路分析》、《模拟电子技术》、《数字电子技术》、《电子技术实训》、《高频电子线路》、《电子测量与仪器》、《电视接收技术》、《电子设计自动化（EDA）技术》、《单片机应用技术》和《C语言》）供电子技术应用、应用电子技术、电子工程、通信、电子设备制造与维修等相关专业使用。

本套教材紧密结合高职高专教育特点，主动适应社会实际需要，突出应用性、针对性，加强实践能力的培养。内容叙述力求深入浅出，将知识点与能力点有机结合，注重培养学生的工程应用能力和解决现场实际问题的能力；内容编排力求简洁明快、形式新颖、目标明确，利于促进学生的求知欲和学习主动性。

根据高职人才培养规格的具体要求，“电子测量与仪器”课程是目前高等职业技术学院电子类及其相关专业的一门重要的课程。本教材编写者均是长期从事高等职业教育、担任电子测量与仪器课程讲授的第一线教学人员和长期从事电子测量仪器检定与维修的工程技术人员。

本教材参考教学时数为60学时。全书共分八章，每章后都配有一定量的思考题与习题。本教材注重实践和应用，在多数章节后面给出了实训参考方案，并在附录中给出了综合实训参考方案。各学校可根据专业设置要求及学校和学生的实际情况，适当调整教学时数，灵活安排授课和实训内容。

本教材由魏中任主编，负责全书的统稿并编写第一章和第六章；蔡光祥任副主编，并编写第二章和第五章；黄燕编写第四章、第七章和第八章；马蓄编写第三章。本书由林训超主审。

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏和错误，殷切希望读者批评指正。

编　者

2002年10月

目　　录

第一章　电子测量与仪器的基础知识 …… 1
第一节　电子测量概述 …… 1
第二节　测量误差 …… 3
第三节　电子测量仪器概述 …… 7
本章小结 …… 8
思考题与习题 …… 9
第二章　信号发生器 …… 10
第一节　概述 …… 10
第二节　低频信号发生器 …… 10
第三节　高频信号发生器 …… 15
第四节　函数信号发生器 …… 18
第五节　合成信号发生器 …… 23
第六节　电视信号发生器 …… 24
第七节　脉冲信号发生器 …… 27
本章小结 …… 28
思考题与习题 …… 29
实训参考方案 …… 29
第三章　示波测量 …… 31
第一节　概述 …… 31
第二节　示波管及波形显示原理 …… 31
第三节　通用示波器 …… 35
第四节　XJ4362 型双踪示波器 …… 42
第五节　数字存储示波器 …… 46
第六节　示波器的应用 …… 50
第七节　晶体管特性图示仪 …… 54
本章小结 …… 63
思考题与习题 …… 64
实训参考方案一 …… 64
实训参考方案二 …… 65
第四章　频率与时间的测量 …… 66
第一节　概述 …… 66
第二节　电子计数器 …… 68
第三节　E312B 型通用电子计数器 …… 75
本章小结 …… 78
思考题与习题 …… 78

实训参考方案 …… 79
第五章 电压测量技术 …… 80
第一节 概述 …… 80
第二节 模拟式交流电压表 …… 83
第三节 数字电压表 …… 88
第四节 数字多用表 …… 96
本章小结 …… 103
思考题与习题 …… 103
实训参考方案 …… 104
第六章 频域测量 …… 106
第一节 时域测量和频域测量的比较 …… 106
第二节 频率特性测试仪 …… 106
第三节 频谱分析仪 …… 112
本章小结 …… 115
思考题与习题 …… 115
实训参考方案 …… 116
第七章 数据域测试 …… 117
第一节 概述 …… 117
第二节 特征分析仪 …… 117
第三节 逻辑分析仪 …… 119
本章小结 …… 126
思考题与习题 …… 126
第八章 自动测试技术 …… 127
第一节 自动测试系统的基本结构 …… 127
第二节 接口总线系统与智能仪器 …… 128
第三节 虚拟仪器 …… 137
本章小结 …… 139
思考题与习题 …… 139
附录 综合实训参考方案 …… 140
参考文献 …… 142

第一章　电子测量与仪器的基础知识



目的与要求　电子测量是信息产业的基础技术，应用广泛。本章要求掌握电子测量、测量误差和电子测量仪器的基本概念，为后续章节的学习打下基础。

第一节　电子测量概述

一、电子测量的意义

1．测量

测量是以确定被测对象量值为目的的全部操作。在测量过程中，人们借助于专门的设备，依据一定的理论，通过实验的方法来确定被测量的量值。量值是由数值和计量单位的乘积所表示的量的大小。没有计量单位的数值是不能作为量值的，也是没有物理意义的。

2．电子测量

电子测量是泛指以电子技术为基本手段的一种测量。在电子测量过程中，是以电子技术理论为依据，以电子测量仪器和设备为手段，对各种电量、电信号及电路元器件的特性和参数进行测量，还可以通过各种传感器对非电量进行测量。

3．电子测量的意义

电子测量涉及从直流到极宽频率范围内所有电量、磁量以及各种非电量的测量。如今，电子测量已成为一门发展迅速、应用广泛、精确度越来越高、对现代科学技术的发展起着巨大推动作用的独立学科。电子测量不仅应用于电学各专业，也广泛应用于物理学、化学、光学、机械学、材料学、生物学、医学等科学领域以及生产、国防、交通、信息技术、贸易、环保乃至日常生活领域等各个方面。

电子测量在信息技术产业中的地位尤为显著。信息技术产业的研究对象及产品无一不与电子测量紧密相连，从元器件的生产到电子设备的组装调试，从产品的销售到维护都离不开电子测量。如果没有统一和精确的电子测量，就无法对产品的技术指标进行鉴定，也就无法保证产品的质量。所以从某种意义上说，电子测量的水平，是衡量一个国家科学技术水平的重要标志之一。

二、电子测量的内容

通常所说的电子测量是指对电子学领域内电参量的测量，其基本内容如下。

（1）电能量的测量　包括电流、电压、功率、电场强度等的测量。

（2）电路元器件参数的测量　包括电阻、电容、电感、阻抗、品质因数、电子器件参数等的测量。

（3）电信号特性的测量　包括波形、频率、周期、时间、相位、失真度、调制度、逻辑状态等的测量。

(4) 电路性能的测量　包括增益、衰减、灵敏度、通频带、噪声系数等的测量。

(5) 特性曲线的显示测量　包括幅频特性曲线、器件特性曲线等的显示测量等。

另外，通过传感器，可将温度、压力、流量、位移等非电量转换成电信号后进行测量，但这不属于本书讨论的范围。

三、电子测量的特点

与其他测量相比，电子测量具有以下特点。

1. 测量频率范围宽

电子测量的频率范围极宽，低至 10^{-4} Hz 以下直到直流，高至 10^{12} Hz 以上。在不同的频率范围内，电子测量所依据的原理、使用的测量仪器、采用的测量方法也各不相同。

2. 测量量值范围广

电子测量的另一个特点是被测对象的量值大小相差悬殊。例如，从宇宙飞船上发射到地球的信号功率通常低于 10^{-13} W，而远程雷达发射的脉冲功率可高达 10^{8} W 以上，两者之比为 $1:10^{21}$。一般情况下，一台测量仪器是难以覆盖如此宽广范围的。但电子测量的这一特点，也要求电子测量仪器应具有足够的测量范围。

3. 测量准确度高

电子测量的准确度比其他测量方法高得多。例如，长度测量的准确度最高为 10^{-8}量级。而电子测量中对频率和时间的测量，由于采用原子频标作基准，可使测量准确度优于 10^{-13} 量级，这是目前人类在测量准确度方面达到的最高指标。因此，为了提高测量准确度，人们往往把其他参数转换成频率或时间后再进行测量。电子测量的这一特点，是它在现代科学技术中广泛应用的原因之一。

4. 测量速度快

由于电子测量是基于电子运动和电磁波传播的原理进行的，因此，它具有与其他测量不能比拟的高速度，这也是它在现代科学技术中得到广泛应用的另一个原因。例如，原子核的裂变过程、航空器和航天器的运行参数等的测量，都需要高速度的电子测量。

5. 易于实现遥测

通过各种类型的传感器，采用有线或无线的方式，可以实现对人体不便于接触或无法达到的领域（如深海、地下、卫星、高温炉、核反应堆内等）进行远距离测量，即遥测。

6. 易于实现测量的自动化

由于电子测量的被测量和它所需要的控制信号都是电信号，非常有利于直接或通过模数变换与计算机相连接，实现自动记录、数据运算和分析处理，组成各种自动测试系统。

电子测量除了以上的优点之外，还存在测量易受干扰，误差处理较为复杂等缺点。

四、电子测量的方法

为了实现测量目的，正确选择测量方法是极其重要的，它直接关系到测量工作能否正确进行和测量结果的有效性。由于电子测量对象的广泛性，测量原理和测量方法的多样性，一个测量方案可以纳入不同的分类方法，因而可以赋予不同的名称。电子测量常见的分类方法有以下几种。

根据测量手段的不同，分为直接测量和间接测量；根据测量性质的不同，分为时域测量、频域测量和数据域测量；根据测量过程的控制不同，分为人工测量和自动测量；根据被

测量与测量结果获取地点的关系，分为本地测量和远地测量；根据被测量在测量过程中是否变化，分为动态测量和静态测量；根据对测量精度的要求不同，分为工程测量和精密测量；根据工作频率的不同，分为低频测量、高频测量和微波测量等。

下面主要讨论两类主要的测量方法和测量方法的选择原则。

1．测量手段不同的测量方法

（1）直接测量　不必测量与被测量有函数关系的其他量，而能直接得到被测量值的测量方法称为直接测量。它是直接从测量仪器上得到的被测量值，因此，直接测量简单、方便。例如，用电压表测量电压，用电子计数器测量频率等。

（2）间接测量　通过测量与被测量有函数关系的其他量，才能得到被测量值的测量方法称为间接测量。在不便使用直接测量、缺乏直接测量的仪器或间接测量的结果更准确的情况下，常采用间接测量。例如，要测量电路中已知电阻 R 上的消耗的功率 P，先测量加在 R 两端的电压降 U，再根据公式 $P = U^2/R$ 求出 P。

2．测量性质不同的测量方法

（1）时域测量　时域测量是指测量被测量随时间的变化规律。典型的例子如用示波器能显示被测信号的瞬时波形，测量它的幅度、宽度、上升沿和下降沿等参数。示波器屏幕的横坐标代表时间。

（2）频域测量　频域测量是指测量被测量随频率的变化规律，即研究被测信号在各频率分量上的幅度大小。典型的例子如用频谱分析仪来分析被测信号的频谱、测量放大器的幅频特性等。频谱分析仪屏幕的横坐标代表频率。

（3）数据域测量　数据域测量是指对数字系统逻辑状态进行的测量，即测量数字信号是“1”还是“0”。逻辑分析仪是数据域测量的典型仪器，它能分析离散信号组成的数据流，可以观察多个输入通道的并行数据，也可以观察一个通道的串行数据。

3．测量方法的选择原则

测量任务确定以后，应根据被测量的特点（包括性质、大小、变化、范围、稳定性、允许的测量时间和空间等）、测量所要求的准确度、测量环境条件以及现有测量设备等进行综合考虑，选择正确的测量方法和合适的测量仪器。只有这样才能保证不损坏被测对象和测量仪器，减少测量误差。

第二节　测 量 误 差

一、测量误差的定义

测量是以确定被测对象量值为目的的全部操作。当某量能被完善地确定并能排除所有测量上的缺陷时，通过测量所得到的量值称为真值。一个量的真值，是在被观测时本身所具有的真实大小，它是一个理想的概念。但是在测量中，由于对客观规律认识的局限性、计量器具不准确、测量手段不完善、测量条件发生变化及测量工作中的疏忽或错误等原因，都会使测量结果与真值不同。测量结果与被测量真值之差称为测量误差。

不同的测量，对其测量误差的大小，也就是测量准确度的要求往往是不同的。但是，随着科技的发展和生产水平的提高，对减小误差提出了越来越高的要求。对很多的测量来讲，测量工作的价值完全取决于测量的准确程度。当测量误差超过一定限度，测量工作和测量结

果不但变的毫无意义，甚至会给工作带来很大的危害。因此，对测量误差的控制就成为衡量测量技术水平的标志之一。

二、测量误差的来源

无论哪种测量，都必须使用测量装置。同时，测量工作又是在某个特定的环境里，由测量人员按照一定的测量方法来完成的。因此总体上讲，测量误差主要来自以下五个方面。

1．测量装置误差

测量装置本身所具有的误差称为测量装置误差。测量装置误差在整个测量中起主要作用。测量装置包括计量器具和辅助设备。

由于设计、制造、检定等的不完善，以及计量器具使用过程中元器件老化、机械部件磨损、疲劳等因素而使计量器具带有误差。计量器具的误差还可以分为：读数误差（包括出厂校准定度不准确产生的校准误差、刻度误差、读数分辨力有限而造成的读数误差以及数字式仪表的±1个字量化误差）；计量器具内部噪声引起的稳定误差；计量器具响应滞后现象造成的动态误差等。

为测量创造必要条件或使测量方便地进行而采用的各种辅助设备或附件都有可能引起误差。如电测量中转换开关接触不好、各类探头带来的误差、低阻测量中连接导线的影响等。

2．环境误差

由于实际环境条件与规定条件不一致所引起的误差称为环境误差。任何测量总是在一定的环境里进行的。环境由多种因素组成，对电子测量而言，最主要的影响因素是环境温度、电源电压和电磁干扰等。

3．方法误差

测量方法不完善引起的误差称为方法误差。测量方法是指根据给定的原理，概括地说明在实施测量中所涉及的一套理论运用和实际操作。由测量方法引起的测量误差主要表现为：测量时所依据的理论不严密，操作不合理，用近似公式或近似值计算测量结果等引起的误差。

4．人员误差

测量人员主观因素和操作技术所引起的误差称为人员误差。人员误差主要由测量者的分辨能力差、视觉疲劳、反应速度慢、不良的固有习惯和缺乏责任心等引起。具体有操作不当、看错、读错、听错和记错等原因。

5．被测量不稳定误差

由测量对象自身的不稳定变化引起的误差称为被测量不稳定误差。由于测量是需要一定时间的，若在测量时间内被测量不稳定而发生变化，那么即使有再好的其他测量条件也是无法得到正确测量结果的。被测量不稳定与被测对象有关，可以认为被测量的真值是时间的函数。如由于振荡器的振荡频率不稳定，则测量其频率必然要引起误差。

在测量工作中，对于误差的来源要认真分析，采取相应的措施，以减少误差对测量结果的影响。

三、测量误差的表示方法

测量误差的表示方法有两种，即绝对误差和相对误差。

1．绝对误差

（1）定义　测量结果与被测量真值之差称为绝对误差。设被测量的真值为 A_0，而测量结果为 Y，则绝对误差 ΔY 可以表示为

$$\Delta Y = Y - A_0 \tag{1-1}$$

测量结果是指由测量所得到的被测量值。上式中，Y 是指计量器具的示值，即由计量器具所指示的被测量值。

前面已提到，真值 A_0 一般无法得到，通常用约定真值（也称实际值）A 来代替A_0，即

$$\Delta Y = Y - A \tag{1-2}$$

在实际测量中，常把高一等级的计量标准所复现的量值作为约定真值。

（2）修正值　修正值 C 与绝对误差的大小相等，符号相反。即

$$C = -\Delta Y \tag{1-3}$$

计量器具的修正值，可通过检定，由上一级标准给出，它可以是表格、曲线或函数表达式等形式。利用修正值和计量器具示值，可得到被测量的实际值

$$A = Y + C \tag{1-4}$$

例如，某电流表测得的电流示值为 0.83 mA，查该电流表的检定证书，得知该电流表在 0.8 mA 及其附近的修正值都为 −0.02 mA，那么被测电流的实际值为

$$A = Y + C = 0.83\ \text{mA} + (-0.02\ \text{mA}) = 0.81\ \text{mA}$$

通常通过加修正值的办法来提高测量的准确度。

绝对误差有计量单位，其大小和符号分别表示示值偏离实际值的程度和方向，但是不能用它来说明测量的准确程度。为了更确切地反映出测量工作的质量，就要用相对误差来表示。

2．相对误差

测量的绝对误差与被测量的约定值之比称为相对误差，常用百分数来表示。约定值可以是实际值、示值或仪器的满量程值 Y_m。

（1）实际相对误差 γ_A　指绝对误差 ΔY 与被测量的实际值 A 的百分比，即

$$\gamma_A = \frac{\Delta Y}{A} \times 100\% \tag{1-5}$$

（2）示值相对误差 γ_Y　指绝对误差 ΔY 与被测量的示值 Y 的百分比，即

$$\gamma_Y = \frac{\Delta Y}{Y} \times 100\% \tag{1-6}$$

对于一般的工程测量，用 γ_Y 来表示测量的准确度较为方便。

（3）引用误差 γ_m　计量器具的绝对误差与其特定值之比称为引用误差。特定值又称为引用值，常取计量器具的满量程值 Y_m，即

$$\gamma_m = \frac{\Delta Y}{Y_m} \times 100\% \tag{1-7}$$

引用误差一般用于连续刻度的仪表，特别是电工仪表。引用误差实际上是给出了仪表各量限内，绝对误差不应超过的最大值

$$\Delta Y = \gamma_m \times Y_m \tag{1-8}$$

比较式（1-6）和式（1-7）可知，为了减少测量中的示值误差，在选择仪表的量程时，应尽量使示值靠近满度值，一般应使示值指示在仪表满刻度值的 2/3 以上区域。但这个原则对于测量电阻的模拟欧姆表（如模拟三用表的欧姆挡）就不适用了，因为在设计和检定欧姆表时，

均以中值电阻为基础，其量程的选择应以电表指针偏转到最大偏转角度的$\frac{1}{3}$～$\frac{2}{3}$区域为宜。

电工仪表常分为0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0共七个级别，这些准确度等级就是按照引用误差来划分的。例如，0.5级的电表，就表明其$\gamma_m \leqslant \pm 0.5\%$，并在表面刻度盘上标以0.5级的标志。若电表有几个量程，则在所有的量程上均取$\gamma_m = \pm 0.5\ \%$。显然，各量程的绝对误差是不一样的。

【例1-1】 检定一个1.5级、满量程值为10 mA的电流表，若在5 mA处的绝对误差最大且为0.13 mA（即其他刻度处的绝对误差均小于0.13 mA），问该表是否合格？

解 根据式（1-7），可求得该表实际引用误差为

$$\gamma_m = \frac{\Delta Y}{Y_m} = \frac{0.13\ \text{mA}}{10\ \text{mA}} = 1.3\%$$

因为$\gamma_m = 1.3\% < 1.5\ \%$，因此，该表是合格的。

四、测量误差的分类

根据性质的不同，测量误差可以分为系统误差、随机误差和粗大误差。

1. 系统误差

在同一被测量的多次测量过程中，保持恒定或以可预知方式变化的测量误差的分量称为系统误差。系统误差体现了测量的准确度。系统误差越小，测量准确度越高。

在测量误差中，系统误差所占的分量起主要作用。测量前，应对所采用的测量装置、测量方法、测量环境等方面进行分析，尽可能找出产生系统误差的因素，并采取相应措施，尽量减少系统误差的影响。

2. 随机误差

在同一被测量的多次测量过程中，以不可预知的方式变化的测量误差的分量称为随机误差。随机误差是由那些对测量值影响较微小，又互不相关的多种因素共同造成的。在足够多次测量中，随机误差服从一定的统计规律，大多接近于服从正态分布，具有对称性、有界性、抵偿性和单峰性等特点。随机误差反映了测量结果的精密度。随机误差越小，测量精密度越高。

根据随机误差的特点，可以通过对多次测量值取算术平均值的方法来削弱随机误差对测量结果的影响。

3. 粗大误差

明显超出规定条件下预期的误差称为粗大误差。

粗大误差是由于读数错误、测量方法错误、计量器具有缺陷、操作不正确以及测量条件的突然变化等原因造成的。

粗大误差是统计的异常值，其绝对值与测量列中其他误差相比明显偏大。带有粗大误差的数据是不可靠的，在可能情况下应重复测量核对这些数据。在数据处理时，带有粗大误差的数据应该删除。

五、测量结果的表示

给出测量结果前，所有测量值应予修正。故测量结果不再含有应修正的系统误差。

测量结果包含数值和单位，如3.2 V、478 kHz等。没有标明单位的测量结果是毫无意义的。

为了说明测量结果的可信赖程度，在表示测量结果时，还应同时注明测量误差或测量不确定度（指被测量的真值所处量值范围的评定）的大小。如 4.32 V±0.01 V 等。当只给出测量的量值而没有注明其误差大小时，通常认为该数值的最后一位存在误差。

第三节　电子测量仪器概述

测量仪器是用于检出或测量一个量或为测量目的供给一个量的器具。采用电子技术测量电量或非电量的测量仪器称为电子测量仪器。

电子测量仪器是信息产业的基础，对于国防、科研、生产和生活等起着非常重要的作用。电子测量仪器伴随着信息技术的发展而发展，由最初的电子管仪器，经过晶体管仪器，再发展到集成电路仪器；由模拟仪器，经过数字仪器，再发展到智能仪器。新中国成立以来，电子测量仪器产业从无到有，已成为一个具有科研、生产和经营较完整的体系，但总体上与世界发展水平相比，还有不小的差距。

一、电子测量仪器的分类

电子测量仪器品种繁多，按功能分类可分为专用仪器和通用仪器两大类。专用仪器是为特定目的而专门设计制造的，它只适用于特定的测量对象和测量条件。通用仪器的灵活性好，应用面广，按功能主要可以分为以下几类。

1．信号发生器

用于提供测量所需的各种波形的信号。如低频信号发生器、高频信号发生器、脉冲信号发生器、函数信号发生器和噪声信号发生器等。

2．信号分析仪器

用于观测、分析和记录各种电量的变化，包括时域、频域和数字域分析仪，如电压表，示波器、电子计数器、频谱分析仪和逻辑分析仪等。

3．网络特性测量仪器

用于测量电气网络的频率特性、阻抗特性等，如频率特性测试仪、阻抗测试仪和网络分析仪等。

4．电子元器件测试仪器

用于测量各种电子元器件的各种电参数或显示元器件的特性曲线等，如电路元件（R、L、C）测试仪、晶体管特性图示仪、集成电路测试仪等。

5．电波特性测试仪器

用于对电波传波、电磁场强度、干扰强度等参量进行测量，如测试接收机、场强测量仪、干扰测试仪等。

6．辅助仪器

用于配合上述各种仪器对信号进行放大、检波、衰减、隔离等，以便上述仪器更充分发挥作用，如各种放大器、检波器、衰减器、滤波器、记录仪以及交、直流稳压电源等。

二、电子测量仪器的误差

在电子测量中，由于电子测量仪器本身性能不完善所引起的误差，称为电子测量仪器的误差，它主要包括以下几类。

1．允许误差

技术标准、检定规程等对电子测量仪器所规定的允许的误差极限值称为允许误差。技术标准通常是指电子测量仪器产品说明书中的技术指标。允许误差可用绝对误差或相对误差表示。

2．基本误差

电子测量仪器在标准条件下所具有的误差称为基本误差。基本误差也称固有误差。标准条件一般规定电子测量仪器影响量的标准值或标准范围［例如环境温度（20±2)℃等］，它比使用条件更加严格，所以基本误差能够更准确地反映电子测量仪器所固有的性能。

3．附加误差

电子测量仪器在非标准条件下所增加的误差称为附加误差。当一个影响量在正常使用条件范围内取任一值，而其他影响量和影响特性均处于标准条件，此时引起的仪器示值的变化就是附加误差。只有当某一影响量在允许误差中起重要作用时才给出，如环境温度变化、电源电压变化、频率变化、量程变化等。

有些电子测量仪器的允许误差就是以“基本误差 + 附加误差”的形式给出。例如，某一信号发生器的输出电压在说明书中规定：在连续状态下，频率为 400 MHz 时，输出电压刻度基本误差不大于±10%；输出电压在其他频率的附加误差为±7%。也就是说，输出电压刻度的允许误差 = ±10%（f = 400 MHz）±7%（$f \neq$ 400 MHz)。

三、测量系统的组成

测量系统是由一些功能不同的环节所组成，这些环节保证了由获取信号到获得被测量值所必需的信号流程功能。从完成测量任务的角度来看，基本的测量系统大致可以分为两种，即对主动量的测量和对被动量的测量，如图 1-1 所示。



（a）对主动量的测量　　（b）对被动量的测量

图 1-1　测量系统的组成方框图

图 1-1（a）中，被测信息即为测试对象，它既可以是电信号，也可以是非电信号。在整个测量系统中，被测信号是自发的，因而是主动的。检测环节主要是针对被测信号是非电量，如温度、压力等，该环节主要由传感器组成，将非电量变换为有用的电量（例如电压、电流)。若被测信息是电信号，则检测环节可以省略。

图 1-1（b）中，测量对象是被测网络中的某个特性参数，它只有在信号源的激励下才能产生，因而是被动的。激励信号由信号发生器提供。

转换环节用于对被测信号进行加工转换，如放大、滤波、检波、调制与解调、阻抗变换、线性化、数/模或模/数转换等，使之成为合乎需要，便于输送、显示或记录以及可作进一步后续处理的信号。显示环节是将加工转换后的信号变成一种能为人们所理解的形式，如模拟指示、数字显示、图形等，以供人们观测和分析。

本　章　小　结

1．在电子测量过程中，是以电子技术理论为依据，以电子测量仪器为手段，对各种电量、电信号及电路元器件的特性和参数进行测量，还可以通过各种传感器对非电量进行

测量。

2．测量任务确定以后，应根据被测量的特点，测量所要求的准确度、测量环境条件以及现有测量设备等进行综合考虑，选择正确的测量方法和合适的测量仪器。

3．测量误差是测量结果与被测量真值之差。误差来源包括仪器、环境、方法、人员和被测量等五个方面。绝对误差只用来说明误差的大小和方向，相对误差还能说明测量的准确程度。误差按其性质可分为系统误差、随机误差和粗大误差三大类。

4．电子测量仪器按功能分可分为专用仪器和通用仪器。其中，通用仪器的灵活性好，应用面广，是本书讨论的重点。

5．电子测量仪器的主要误差：允许误差、基本误差、附加误差。



思考题与习题

1-1　什么叫电子测量？下列两种情况是否为电子测量，为什么？

① 用水银温度计测量温度。

② 用数字温度计测量温度。

1-2　电子测量的主要内容有哪些？

1-3　简述电子测量的特点。

1-4　测量误差可能会来自哪些方面？

1-5　若被测电压的实际值为 10 V，现有两只电压表：150 V、0.5 级和 15 V、2.5 级。问选哪一只电压表测量更准确？

1-6　测量误差按性质的不同可以分为哪几类？

1-7　电子测量仪器按功能可以分为哪几类？

1-8　电子测量仪器有哪些误差？

第二章　信号发生器



目的与要求　信号发生器是最基本、应用最广泛的电子测量仪器之一。本章重点要求掌握低频信号发生器、高频信号发生器、函数信号发生器的基本组成原理和正确使用方法。

第一节　概　　述

信号发生器又叫信号源，它是在电子测量中提供符合一定技术要求的电信号的仪器。信号发生器可产生不同波形、频率和幅度的信号，为测试各种模拟系统和数字系统提供不同的信号源。

一、信号发生器的分类

1．按输出波形分类

① 正弦信号发生器：产生正弦波或受调制的正弦波。

② 脉冲信号发生器：产生脉宽可调的重复脉冲波。

③ 函数信号发生器：产生幅度与时间成一定函数关系的信号，如正弦波、三角波、方波等各种信号。

④ 噪声信号发生器：产生各种模拟干扰的电信号。

2．按输出频率范围分类

① 超低频信号发生器：频率范围为 0.001 Hz～1 kHz。

② 低频信号发生器：频率范围为 1 Hz～1 MHz。

③ 视频信号发生器：频率范围为 20 Hz～10 MHz。

④ 高频信号发生器：频率范围为 200 kHz～30 MHz。

⑤ 甚高频信号发生器：频率范围为 30～300 MHz。

⑥ 超高频信号发生器：频率范围为 300 MHz 以上。

二、信号发生器的发展趋势

由于电子技术的迅速发展，促使信号发生器种类日益增多，性能日益提高。随着微处理器的出现，更促使信号发生器向着自动化、智能化方向发展。现在的许多信号发生器都带有微处理器，具有自校、自检、自动故障诊断和自动波形形成和修正等功能。当前信号发生器总的趋势是向着宽频率覆盖、高精度、多功能、多用途、自动化和智能化方向发展。

第二节　低频信号发生器

低频信号发生器主要用来产生频率范围为 1 Hz～1 MHz 的正弦波信号。实际上，许多低频信号发生器除了产生正弦波外，也产生脉冲波信号。低频信号发生器可用来测量收音

机、组合音响设备、电子仪器、无线电接收机等电子设备的低频放大器的频率特性。

一、基本组成和工作原理

低频信号发生器的基本组成框图如图 2-1 所示。

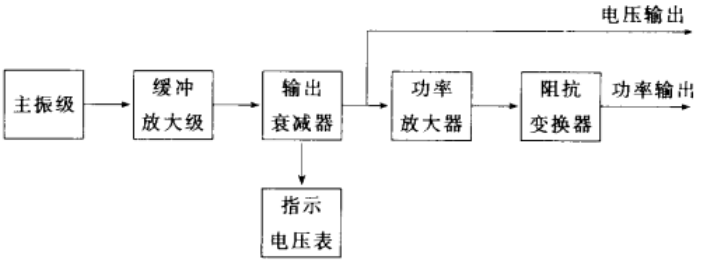


图 2-1　低频信号发生器方框图

1．主振级

主振级用来产生低频正弦信号，其振荡频率范围即为信号发生器的有效频率范围。常见的电路形式有差频式和 RC 振荡两类。

（1）差频式振荡器　差频式振荡器的原理如图 2-2 所示。由两个高频振荡器分别产生一个频率固定的振荡信号 f_1 和另一个频率可变的振荡信号 f_2，同时进入混频器，产生低频差频信号，再经过低通滤波器去掉高频成分，最后通过低频放大器的放大，即可得到具有一定幅度的低频信号电压。

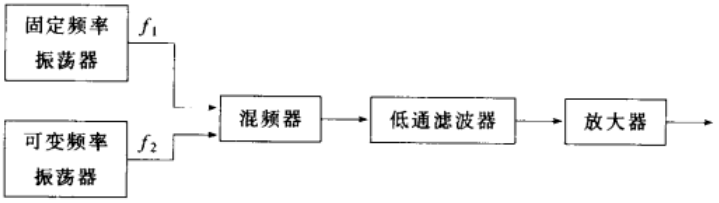


图 2-2　差频式振荡器原理框图

用这种方法产生的低频正弦信号，其频率覆盖面比较宽。缺点是频率稳定性差，特别是 f_1 与 f_2 接近时，极易产生干扰，这样也就很难获得较低的差频输出。

（2）RC 振荡器　为了克服以上差频式振荡器的缺点，现代低频信号发生器普遍应用 RC 振荡器。RC 振荡器又可分为 RC 移相振荡器、RC 双 T 振荡器、RC 文氏电桥振荡器三种。由于频率特性不理想或调节不便等原因，前两种振荡器一般不采用，而用得较多的是 RC 文氏电桥振荡器，它具有输出波形好、振幅稳定、频率范围宽及频率调节方便等优点。

图 2-3 是 XD-22A 型低频信号发生中振荡器的原理图。RC 文氏电桥振荡器实际上是一种电压反馈式振荡器，它由两级负反馈放大器 A 及一个具有选频作用的正反馈支路组成。其中 R_1、C_1、R_2、C_2 等组成具有选频作用的串-并联正反馈支路（见图 2-4），只能使 $f_0=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{R_1C_1R_2C_2}}$ 的信号满足电路起振条件，确保频率稳定。由热敏电阻 R_t 组成的负反馈支路主要起稳幅作用。整个电路频率的调节是通过改变桥路电阻值和电容值进行的，用波段开关改变 R_1、R_2 进行频率粗调，用同轴双联可变电容器改变 C_1、C_2 进行频率细调。

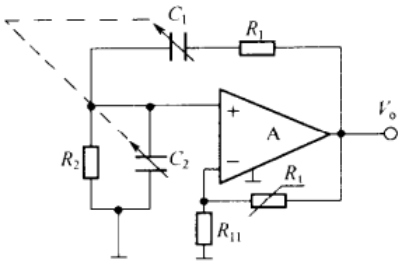


图 2-3　XD-22A 型的振荡器原理图

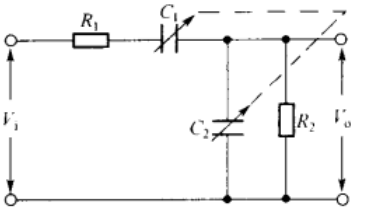


图 2-4　串-并联正反馈选频网络

2．缓冲放大器

缓冲放大器兼有缓冲和电压放大的作用。缓冲的目的是为了隔离后级电路对主振电路的影响，保证主振频率稳定，一般采用射（源）极跟随器或运放组成的电压跟随器，放大的目的是为了使主振级的输出电压达到预定技术指标，要求频带宽、谐波失真小、工作稳定等。

3．衰减器

输出衰减器用于改变信号发生器的输出电压或功率，通常分为连续调节和步进调节。连续调节由电位器实现，步进调节由电阻分压器实现。图 2-5 所示电路是 XD-22A 型低频信号发生器中采用的输出衰减器。

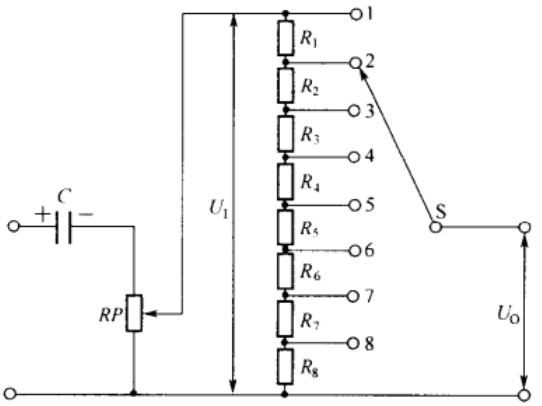


图 2-5　衰减器原理图

由电位器 RP 取出一部分信号电压加于由 $R_1 \sim R_8$ 组成的步进衰减器，调节电位器在不同位置，或调节波段开关 S 处不同挡位，均可使衰减器输出不同的电压。信号发生器对步进衰减量的表示通常有两种。一种是直接用步进衰减器的输出电压 U_O 与输入电压 U_I 的比值来表示，即 U_O/U_I。例如，当 $U_O/U_I = 0.1$ 时，表示为 $\times 0.1$。另一种是将上述的比值取对数再乘以 20，即 $20\lg(U_O/U_I)$，单位为 dB（分贝）。由于比值总是小于 1，其对数必定为负值，为了不造成混淆，有时也将负号省去。

4．功率放大器

功率放大器对衰减器送来的电压信号进行功率放大，使之达到额定的功率输出。要求功率放大器的工作效率高，谐波失真小。

5．阻抗变换器

阻抗变换器用于匹配不同阻抗的负载，以便获得最大输出功率。

6．指示电压表

指示电压表用于指示电压放大器的输出电压幅度。

二、XD-22A 型低频信号发生器

XD-22A 型低频信号发生器是一种多功能、宽频带的通用测量仪器，它除了产生正弦波信号外，还能产生脉冲信号和逻辑信号，并采用 3 位数码显示频率。

1．主要技术性能

（1）频率范围　1 Hz～1 MHz，分成六个波段。

Ⅰ波段：1～10 Hz；

Ⅱ波段：10～100 Hz；

Ⅲ波段：100 Hz～1 kHz；

Ⅳ波段：1～10 kHz；

Ⅴ波段：10～100 kHz；

Ⅵ波段：100 kHz～1 MHz。

（2）频率误差　Ⅰ～Ⅴ波段小于±（1.5%输出频率＋1 Hz），Ⅵ波段小于±2%输出频率。

（3）正弦波信号

幅度：＞6 V

频响：＜±1 dB。这一技术性能的含义是说，信号频率在 1 Hz～1 MHz 范围内变化时，信号发生器对不同频率的信号增益的偏差要小于 1 dB。

电压表误差：＜±5%满度值。

输出阻抗：600 Ω±10 Ω。

（4）脉冲信号（10 Hz～200 kHz）

幅度：$U_{P\text{-}P}$＝0～10 V 连续可调。

上升、下降时间：＜0.3 μs。

上冲、下冲时间：＜7%。

宽度：可调。

（5）逻辑信号

波形：方波（正极性）。

幅度：高电平为 4.5 V±0.5 V，低电平＜0.3 V。

2．使用方法

XD-22A 型低频信号发生器的面板结构如图 2-6 所示。

① 该仪器有三种输出信号，通过转换开关 S 进行选择。当转换开关 S 按出时，下面的

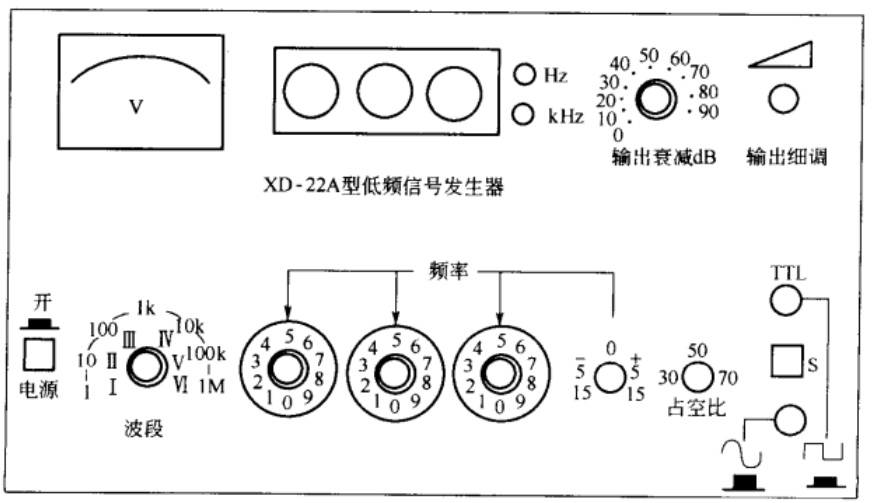


图 2-6　XD-22A 型低频信号发生器面板图

输出孔输出正弦波信号；当转换开关S按进时，下面的输出孔输出脉冲信号，上面的输出孔输出逻辑信号（TTL方波信号）。

② 开机前把输出微调钮置于最小值处，防止开机时因起振幅度超过正常值而打弯表针。

③ 调节波段开关及各个频率转换旋钮至所需频率上，频率值由数码管显示。

④ 正弦波信号的输出电压，可通过“输出衰减”和“输出细调”旋钮，根据实际需要进行调节。衰减分贝数（dB）与衰减倍数的关系，见表2-1。实际输出电压应是电压表指示的电压值被衰减的分贝数相对应的倍数来除所得到的结果。

表2-1 分贝（dB）与倍数间的关系

分贝/dB	电压与电流倍数	功率倍数	分贝/dB	电压与电流倍数	功率倍数
0	1.00	1.00	0	1.00	1.00
0.2	1.02	1.05	-0.2	0.977	0.955
0.4	1.05	1.10	-0.4	0.955	0.912
0.6	1.07	1.15	-0.6	0.933	0.877
0.8	1.10	1.20	-0.8	0.912	0.832
1	1.12	1.26	-1	0.891	0.794
2	1.26	1.58	-2	0.794	0.631
3	1.41	2.00	-3	0.708	0.501
4	1.58	2.51	-4	0.631	0.395
5	1.78	3.16	-5	0.562	0.316
6	2.00	3.98	-6	0.501	0.251
7	2.24	5.01	-7	0.447	0.200
8	2.51	6.31	-8	0.398	0.158
9	2.82	7.94	-9	0.355	0.126
10	3.16	10.00	-10	0.316	0.100
11	3.55	12.6	-11	0.282	0.079
12	3.98	15.8	-12	0.251	0.063
13	4.47	19.95	-13	0.224	0.050
14	5.01	25.10	-14	0.200	0.040
15	5.26	31.62	-15	0.178	0.032
16	6.31	39.8	-16	0.158	0.025
17	7.08	50.12	-17	0.141	0.020
18	7.94	63.1	-18	0.126	0.015
19	8.91	79.43	-19	0.112	0.013
20	10.00	100.00	-20	0.100	0.010
21	11.22	126.00	-21	0.089	0.008
22	12.59	158.50	-22	0.079	0.006
23	14.13	199.50	-23	0.071	0.005
24	15.85	251.00	-24	0.063	0.004
25	17.78	316.00	-25	0.056	0.003
26	20.00	398.00	-26	0.050	0.002 5
30	31.62	10^3	-30	0.032	10^{-3}
40	100.00	10^4	-40	0.010	10^{-4}
50	316.00	10^5	-50	0.003	10^{-5}
60	1 000.00	10^6	-60	0.001	10^{-6}
70	3 160.00	10^7	-70	0.000 3	10^{-7}
80	10^4	10^8	-80	0.000 1	10^{-8}
90	3.16×10^4	10^9	-90	0.000 03	10^{-9}
100	10^5	10^{10}	-100	0.000 01	10^{-10}
120	10^6	10^{12}	-120	0.000 001	10^{-12}

【例 2-1】 将 XD-22A 型低频信号发生器的“输出衰减”旋钮置于 50 dB 时，指示电压表的读数为 6 V，这时的实际输出电压是多少？

解　查表 2-1，可知 50 dB 所对应的倍数为 316，故实际输出电压为

$$U = 6/316 = 18.99 \text{ mV}$$

⑤ 输出脉冲信号时，其幅度可由衰减器和微调电位器来调节。脉冲的占空比是指脉冲电压的周期与脉冲宽度之比，调节“占空比”旋钮可以得到不同宽度的脉冲信号。

⑥ 信号输出电缆的长度以 1 ± 10% m 为宜，过长或过短都会引起高频段（f > 500 kHz）电压误差。

第三节　高频信号发生器

高频信号发生器是一种向电子设备和电路提供等幅正弦波和调制波的高频信号源，其工作频率一般为 100 kHz～35 MHz，主要用于各种接收机的灵敏度、选择性等参数的测量。高频信号发生器按调制类型不同可分为调幅和调频两种。

一、基本组成和原理

高频信号发生器主要包括主振级、内调制振荡级、调制级、输出级、监测级及电源这几大部分，如图 2-7 所示。由主振级产生的高频正弦信号，经调制级进行幅度调制，送至输出级，由内部的衰减电路衰减后输出。

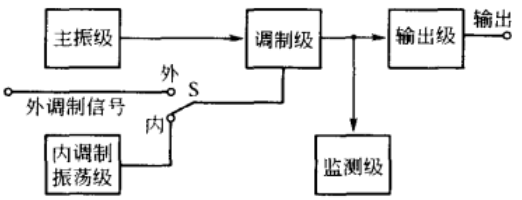


图 2-7　高频信号发生器的组成

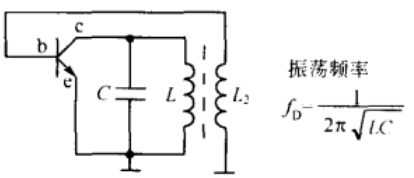


图 2-8　变压器反馈式振荡器

1．主振级

主振级就是载波发生器，或叫高频振荡器，其作用是产生高频等幅信号。振荡电路通常采用 LC 振荡器，根据反馈方式，可分为变压器反馈式、电感反馈式（也称电感三点式）及电容反馈式（也称电容三点式）等三种振荡器形式。如图 2-8、图 2-9、图 2-10 所示。通常通过切换振荡回路中不同的电感 L 来改变频段，通过改变振荡回路的电容 C 来对振荡频率进行连续调节。

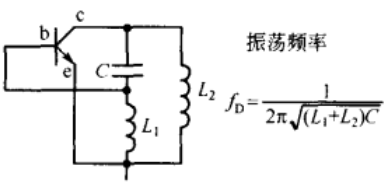


图 2-9　电感反馈式振荡器

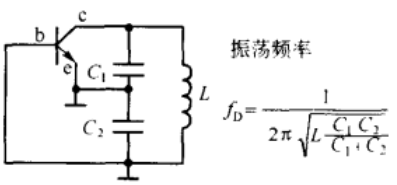


图 2-10　电容反馈式振荡器

2．调制信号发生器

调制信号分内调制信号和外调制信号两种。调制信号发生器就是产生内调制信号的，也叫内调制振荡级，一般高频信号发生器产生的内调制信号有 400 Hz 和 1 kHz 两种。

3．调制级

将主振级产生的高频等幅波（载波）与调制信号发生器产生的音频调制信号（400 Hz 或 1 kHz）同时送到调制级后，从调制级输出的就是载有音频信号（400 Hz 或 1 kHz）的调制波了。

4．输出级

输出级的作用是对调制信号进行放大和滤波，在此基础上通过衰减器对输出电平进行较大范围的调节和输出阻抗的变换，以适应各种不同的需要。其电路主要由放大器、滤波器和衰减器等组成，而对输出电平的调节起主要作用的衰减器则包括细调衰减器、步级衰减器和分压电缆。

二、YB1051 高频信号发生器

1．主要性能指标

（1）频率范围　0.1～40 MHz，数显，误差 0.1%

（2）输出幅度　最大 1 V 有效值，稳幅，数显，连续可调

（3）输出阻抗　50 Ω

（4）调制方式　内 1 kHz

调　　频　频偏 100 kHz，连续可调

调　　幅　深度 0～50%，连续可调

（5）低频输出　1 kHz

失 真 度　小于 1%

输出幅度　最大 2.5 V 有效值，连续可调

衰　　减　10～40 dB

2．YB1051 高频信号发生器的使用

YB1051 高频信号发生器的面板图如图 2-11 所示。

（1）面板各操作键的作用

a．电源开关

b．音频频率选择（按进为 400 Hz，弹出为 1 kHz）

c．音频输出衰减（按进为衰减）

d．音频输出/输入选择（按进为输入，弹出为输出）

e．音频输出幅度细调

f．低频输出插座

g．调幅度调节

h．调幅选择（按进有效）

i．频率宽度调节

j．调频选择（按进有效）

k．幅度细调

l．载波输出幅度衰减

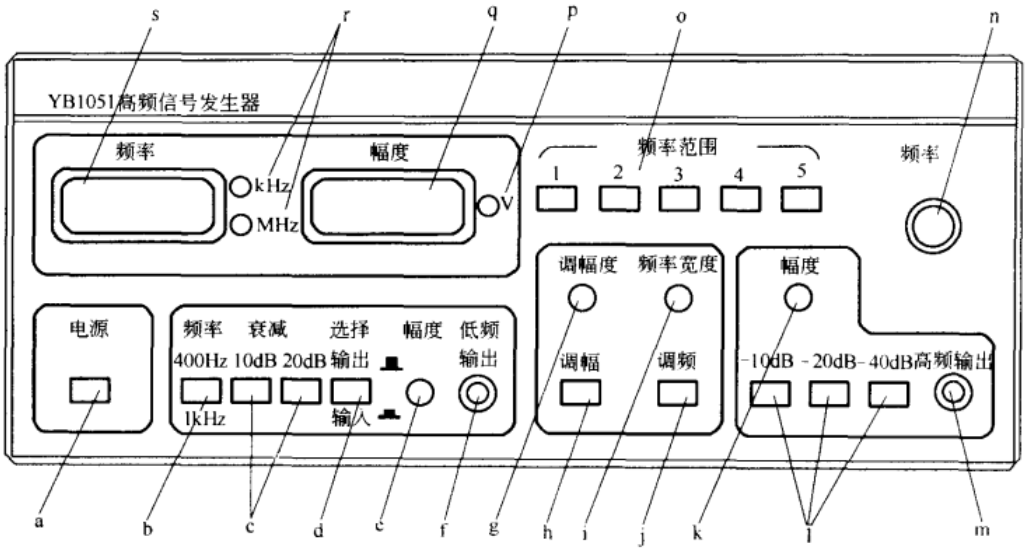


图 2-11　YB1051 高频信号发生器面板图

m. 高频输出插座

n. 频率调节旋钮

o. 频率范围选择

p. 输出幅度单位

q. 输出幅度显示

r. 输出波形频率单位

s. 输出波形频率显示

(2) 使用方法

① 接通电源 a，预热 5 min 左右。

② 音频信号的使用。将输入/输出开关 d 弹出，根据需要设置音频频率和幅度。选择开关 b，按进为 400 Hz，弹出为 1 kHz；选择开关 c，同时按进为 30 dB，同时弹出为 0 dB。并可同时用细调 e 输出适当幅度，插座 f 输出音频信号。

③ 高频信号的使用。调幅 h 及调频 j 弹出，开关 o 选择合适挡，并调节频率 n 观察频率显示 s 使其达到需要的频率，同时调节 k 观察幅度显示 q 使其达到需要的幅度，衰减开关 l 可对输出幅度衰减，插座 m 输出高频信号。

④ 调幅信号的使用。

内调幅：输入/输出开关 d 弹出，调幅开关 h 按进，旋转调幅度旋钮 g 可调节调幅的深度，并可根据高频信号的使用方法，调节调幅波的载波的频率和幅度，插座 m 输出已调幅的波形。

外调幅：输入/输出开关 d 按进，将外调幅信号输入低频输出插座 f，调幅开关 h 按进，旋转调幅旋钮 g 可调节调幅波的深度，并可根据高频信号的使用方法，调节调幅波的载波的频率和幅度，插座 m 输出已调幅的信号。

⑤ 调频信号的使用。

内调频：输入/输出开关 d 弹出，调频开关 j 按进，旋转调频宽度旋钮 i 可调节调频波的频偏，并可根据高频信号的使用方法，调节调频波的载波频率和幅度，插座 m 输出已调频的波形。

外调频：输入/输出开关 d 按进，将外调频信号输入低频输出插座 f，调频开关 j 按进，旋转调频宽度旋钮 i 可调节调频波的频偏，并可根据高频信号的使用方法，调节调频波的载波频率和幅度，高频插座 m 输出已调频的波形。

第四节　函数信号发生器

函数信号发生器是一种多波形信号源，它能产生某些特定的周期性时间函数波形。工作频率可以从几 mHz（毫赫兹）直至几十 MHz（兆赫）。一般能产生正弦波、方波和三角波，有的还可以产生锯齿波、矩形波（宽度和重复周期可调）、正负脉冲等波形。它也能具有调频、调幅等调制功能。函数信号发生器可在生产、测试、仪器维修和实验时作信号源使用。除工作于连续状态外，有的还能键控、门控或工作于外触发方式。

一、函数信号发生器的基本原理

产生信号的方法有三种：一种是用施密特电路产生方波，然后经变换得到三角波和正弦波。第二种是先产生正弦波再得到方波和三角波。第三种是先产生三角波再转换为方波和正弦波。

1．由方波产生三角波、正弦波

图 2-12 是由方波产生三角波、正弦波的函数发生器电路方案。施密特触发器用来产生方波。它可由外触发脉冲触发，也能使用由内触发脉冲发生器提供的触发信号，这时输出信号频率由触发信号的频率所决定。施密特触发器在触发信号的作用下翻转，并产生方波，方波信号送至积分器。通常积分器使用线性很好的密勒积分电路，于是在积分器输出端可得到三角波信号。调节积分器的积分时间常数 RC 的值，可改变积分速度，即改变输出的三角波斜率，从而调节三角波的幅度。

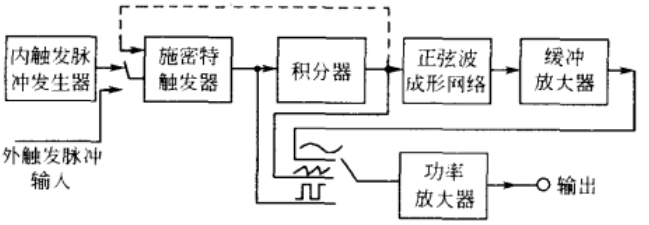
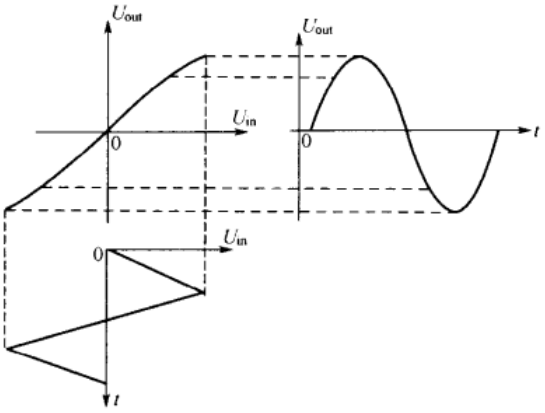


图 2-12　函数信号发生器原理方框图之一

也可按图中虚线所示，将积分器输出的三角波信号反馈至施密特触发器的输入端，构成正反馈环，组成振荡器。这时工作频率则由反馈决定。由于将三角波引至施密特触发器的输入端作为反馈信号，而施密特的触发电平又是固定的，这时调节 RC 值可改变到达触发电平所需时间，从而改变所产生的方波和三角波信号的频率，当 RC 数值很大时可获得频率很低的信号。

正弦波形通常是令三角波经过非线性成形网络，用分段折线逼近的方法来实现。例如若一个电路具有如图 2-13（a）所示的电路特性，将三角波加到该电路后，能得到如图 2-13（b)所示的波形。由图可见，这种网络对信号的衰减会随三角波幅度的加大而增加，产生削顶，从而使输出波形向正弦波逼近，如果折线段选得足够多，并适当选择转折点的位

置，便能得到非常逼真的正弦波。



(a) 三角波输入　　(b) 正弦波形成

图 2-13　三角波逼近正弦波

图 2-14 为实际的正弦波成形网络。电路中使用了 6 对二极管。正、负直流稳压电源和电阻 $R_1 \sim R_7$ 及 $R_1' \sim R_7'$ 为二极管提供适当的偏压，以控制三角波逼近正弦波时转折点的位置。随着输入电压的变化，6 对二极管依次导通和截止，并把电阻 $R_8 \sim R_{13}$ 依次接入电路或从电路断开。电路中每个二极管可产生一个转折点。在正半周时，一对二极管可获得三段折线；在负半周时也产生三段折线。这样使用 1 对二极管就可获得 6 段折线。以后每增加一对二极管，正负半周可各增加二段。因此它可产生 26 段折线，由这种正弦波成形网络获得的正弦信号失真小，用 5 对二极管时可小于 1%，用 6 对时可小于 0.25%。

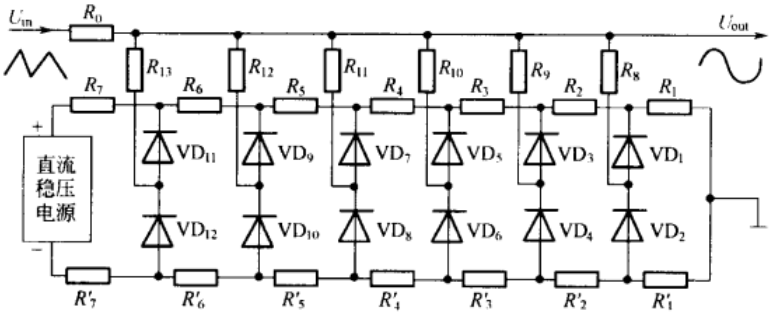


图 2-14　正弦波成形网络

2．由正弦波产生方波、三角波

也可以采用由正弦波产生方波和三角波的方案，其原理方框图如图 2-15 所示。该仪器的工作频率为 1 Hz～1 MHz。这种方案中振荡器采用通常的文氏电桥振荡电路，输出正弦波的波形很好。在 20 Hz～20 kHz 范围内，谐波失真度可小于 0.1%。

正弦信号送至整形电路限幅，再经微分、单稳态调宽、放大，便得到幅度可调的正负矩形脉冲，且其宽度可在 0.1～10 000 μs 内连续调节。脉冲前沿小于 40 ns。

负矩形脉冲送至锯齿波产生电路，从而得到扫描时间可连续调节的锯齿波信号。扫描时间为 0.1～10 000 μs。负矩形脉冲再经微分、放大后，可输出宽度小于 0.1 μs 的正负尖脉冲。

3．由三角波产生方波、正弦波

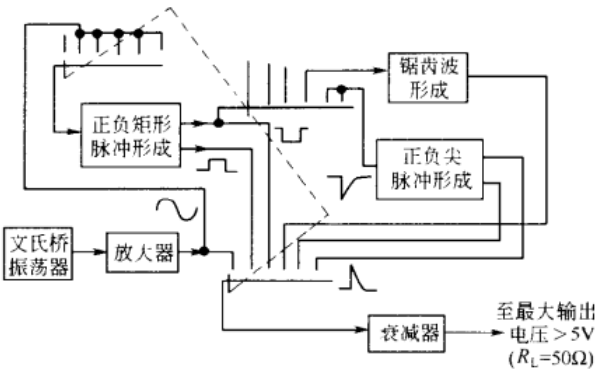


图 2-15　函数信号发生器原理方框图之二

在一些新型的晶体管化和集成化的函数信号发生器中，采用正负电源对电容积分，先产生三角波，再转换为方波和正弦波。其原理方框图如图 2-16 所示。

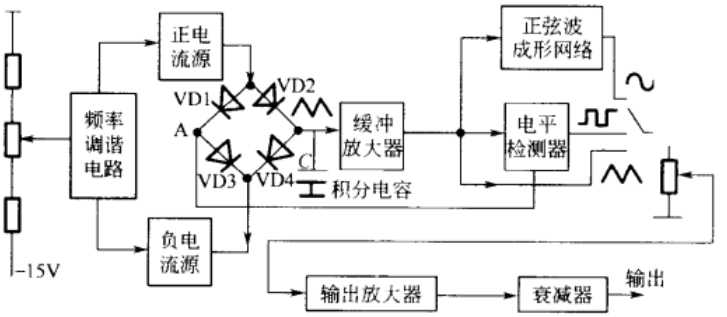


图 2-16　函数信号发生器原理方框图之三

该仪器利用正、负电流源对积分电容充放电，产生线性很好的三角波。改变正、负电流源的激励电压，能够改变电流源的输出电流，从而改变三角波的充放电速度，使三角波的重复频率得到改变，实现频率调谐。

正负电流源的工作转换受电平检测器控制，它可用来交替切换送往积分器的充电电流正负极性，使缓冲放大器输出一定幅度的三角波信号，同时，电平检测器则输出一定幅度的方波。三角波再经正弦波成形网络，可输出和三角波峰—峰值相同的正弦波。

三角波、方波和正弦波信号经选择开关送往输出放大器后输出。输出端接有衰减器，用于调整输出电压的大小。

二、YB1602 函数信号发生器

1．主要性能指标

（1）频率范围　0.2 Hz～2 MHz

（2）输出波形　正弦波、方波、三角波、斜波、脉冲波

（3）电压输出幅度　20 V_{P-P}（1 MΩ），10 V_{P-P}（50 Ω）

（4）直流电平偏置　±10 V（1 MΩ），±5 V（50 Ω）

（5）方波上升时间　100 ns

（6）输出阻抗　50 Ω

（7）占空比调节　20％～80％

（8）外测频率　1 Hz～10 MHz

5 位显示，±1％读数±1 个字

（9）计数频率　5 位显示，最大 99 999

（10）电压幅度显示　3 位显示；分辨率：1 mV_{P-P}

2．使用方法

YB1602 函数信号发生器的面板图如图 2-17 所示。

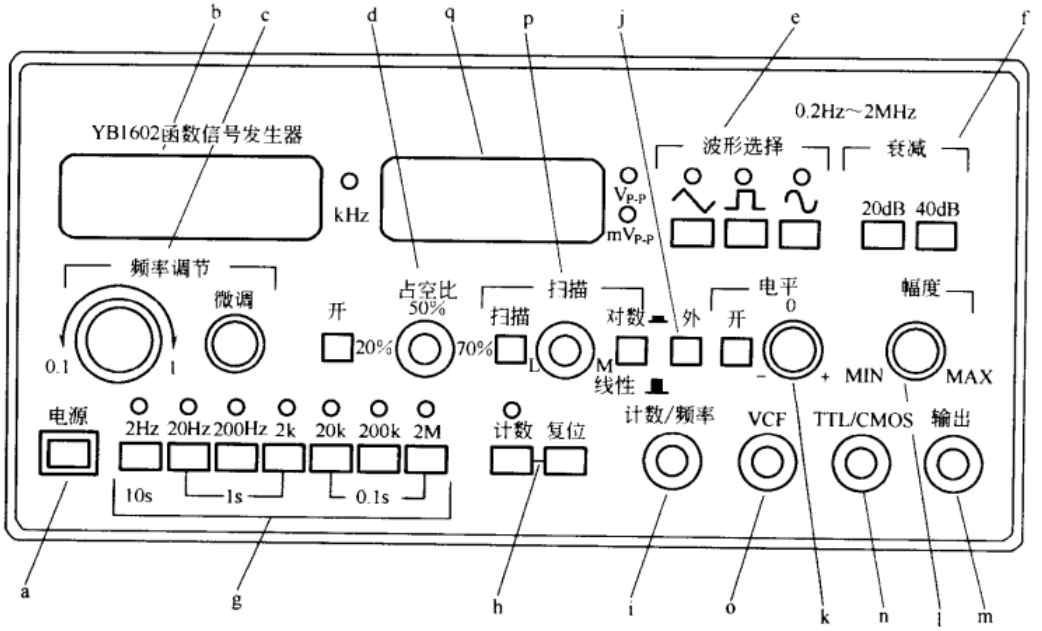


图 2-17　YB1602 函数信号发生器面板图

（1）面板各操作键的作用

a．电源开关（POWER）：将电源开关按键弹出即为“关”位置。将电源线接入，按进电源开关，电源接通。

b．LED 显示窗口：此窗口指示输出信号的频率，当“外测”开关按入，显示外测信号的频率。如超出测量范围，溢出指示灯亮。

c．频率调节旋钮（FREQUENCY）：调节此旋钮改变输出信号频率，顺时针旋转，频率增大；逆时针旋转，频率减小；微调旋钮可以微调频率。

d．占空比率（DUTY）：占空比开关，占空比调节旋钮。将占空比开关按入，占空比指示灯亮，调节占空比旋钮，可改变波形的占空比。

e．波形选择开关（WAVE FORM）：按对应波形的某一键，可选择需要的波形。

f．衰减开关（ATTE）：电压输出衰减开关，二挡开关组合为 20 dB、40 dB、60 dB。

g．频率范围选择开关（并兼频率计闸门开关）：根据所需要的频率，按其中一键。

h．计数、复位开关：按计数键，LED 显示开始计数，按复位键，LED 显示全为 0。

i．计数/频率端口：计数、外测频率输入端口。

j．外测频率开关：此开关按入 LED 显示窗显示外测信号频率或计数值。

k．电平调节：按入电平调节开关，电平指示灯亮，此时调节电平调节旋钮，可改变直

流偏置电平。

l. 幅度调节旋钮（AMPLITUDE）：顺时针调节此旋钮，增大电压输出幅度；逆时针调节此旋钮可减小电压输出幅度。

m. 电压输出端口（VOLTAGE OUT）：电压输出由此端口输出。

n. TTL/CMOS 输出端口：由此端口输出 TTL/CMOS 信号。

o. VCF：由此端口输入电压控制频率变化。

p. 扫描：按入扫描开关，电压输出端口输出信号为扫描信号，调节速率旋钮，可改变扫描速率，改变线性/对数开关可产生线性扫描和对数扫描。

q. 电压输出指示：3 位 LED 显示输出电压值，输出接 50 Ω 负载时应将读数÷2。

（2）使用方法　打开电源开关之前，首先检查输入的电压，将电源线插入后面板上的电源插孔，设定各个控制键为：

电源开关键弹出；

衰减开关（ATTE）弹出；

外测频率（COUNTER）开关弹出；

电平开关弹出；

扫描开关弹出；

占空比开关弹出。

所有的控制键如上设定后，打开电源。函数信号发生器默认 10 k 挡正弦波，LED 显示窗口显示本机输出信号频率。

① 将电压输出信号由幅度（VOLTAGE OUT）端口通过连接线送入示波器 Y 通道输入端口。

② 三角波、方波、正弦波的产生：将波形选择开关（WAVE FORM）分别按正弦波、方波、三角波，此时示波器屏幕上将分别显示正弦波、方波、三角波；

改变频率选择开关，示波器显示的波形以及 LED 窗口显示的频率将发生明显变化；

幅度旋钮（AMPLITUDE）顺时针旋转至最大，示波器显示的波形幅度将≥20 V_{P-P}；

将电平开关按入，顺时针旋转电平旋钮至最大则示波器波形向上移动，逆时针旋转则示波器波形向下移动，最大变化量 ± 10 V 以上（注意信号超过 ± 10 V 时被限幅）；

按下衰减开关，输出波形将被衰减。

③ 计数、复位：按复位键，LED 显示全 0；

按计数键，计数/频率输入端输入信号时，LED 显示开始计数。

④ 斜波产生：波形开关置“三角波”；

占空比开关按入指示灯亮；

调节占空比旋钮，三角波将变成斜波。

⑤ 外测频率：按入外测开关，外测频率指示灯亮；

外测信号由计数/频率输入端输入；

选择适当的频率范围，由高量程向低量程选择合适的有效数，确保测量精度（注意：当有溢出指示时，请提高一挡量程）。

⑥ TTL 输出：TTL/CMOS 端口接示波器 Y 通道输入端（DC 耦合输入），示波器将显示方波或脉冲波；该输出端可作 TTL/CMOS 数字电路实验时钟信号源。

⑦ 扫描（SCAN）：按入扫描开关，此时幅度输出端口输出的信号为扫描信号；

线性/对数开关，在扫描状态下弹出时为线性扫描，按入时为对数扫描；

调节扫描旋钮，可改变扫描速率，顺时针调节则增大扫描速率，逆时针调节则减慢扫描速率。

⑧ VCF（压控调频）：由 VCF 输入端口输入 1～5 V 的调制信号。此时，幅度输出端口为压控信号。

⑨ 调频（FM）：由 FM 输入端口输入电压为 10 Hz～20 kHz 的调制信号，此时，幅度端口输出为调频信号。

⑩ 50 Hz 正弦波：由交流 OUTPUT 输出端口输出 50 Hz 约 2 V_{P-P}的正弦波。

第五节　合成信号发生器

合成信号发生器是用频率合成器代替信号发生器中的主振荡器。它既有信号发生器良好的输出特性和调制特性，也有频率合成器的高稳定度、高分辨力的优点，同时输出信号的频率、电平、调制深度等均可程控，是一种先进高档次的信号发生器。为了保证良好的性能，合成信号发生器的电路一般都比较复杂，但其核心是频率合成器。

频率合成器是把一个（或少数几个）高稳定度频率源 f_s 经过加、减、乘、除及其组合运算，产生在一定频率范围内、按一定的频率间隔（或称频率跳步）的一系列离散频率的信号。频率合成的方法分为直接合成法和间接合成法两种。

1. 直接合成法

直接合成法是将基准晶体振荡器产生的标准频率信号，利用倍频器、分频器、混频器及滤波器等进行一系列四则运算以获得所需要的频率输出。图 2-18 是直接式频率合成器的原理图。图中晶振产生 1 MHz 基准信号，并由谐波发生器产生相关的 1 MHz、2 MHz、…、9 MHz 等基准频率，然后通过十进制分频器（完成÷10 运算）、混频器和滤波器（完成加法或减法运算），最后产生 4.628 MHz 输出信号。只要选取不同次谐波进行合适的组合，就能得到所需频率的高稳定度信号，频率间隔可以做到 0.1 Hz 以下。这种方法频率转换速度快，频谱纯度高。但它需要众多的混频器、滤波器，因而显得笨重。目前多用在实验室、固定通讯、电子对抗和自动测试等领域。

2. 间接合成法

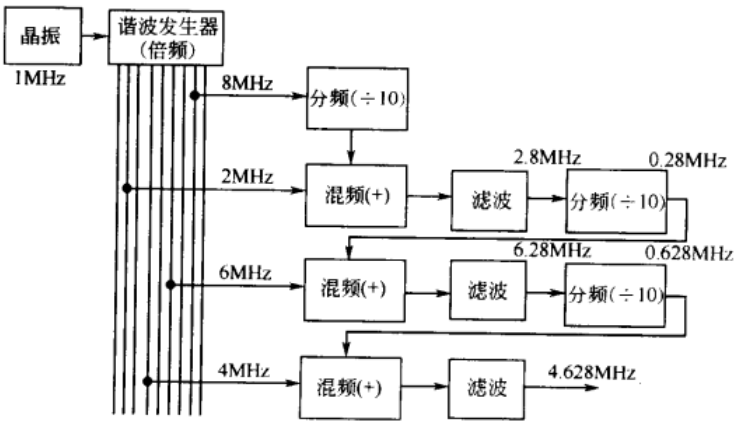


图 2-18　直接式频率合成器原理框图

间接合成法也称锁相合成法，它是通过锁相环来完成频率的加、减、乘、除。锁相环具有滤波作用，其通频带可以做得很窄，并且中心频率易调，又能自动跟踪输入频率，因而，可以省去直接合成法中使用的大量滤波器，有利于简化结构，降低成本，便于集成。

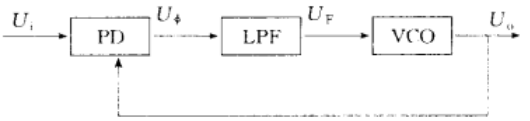
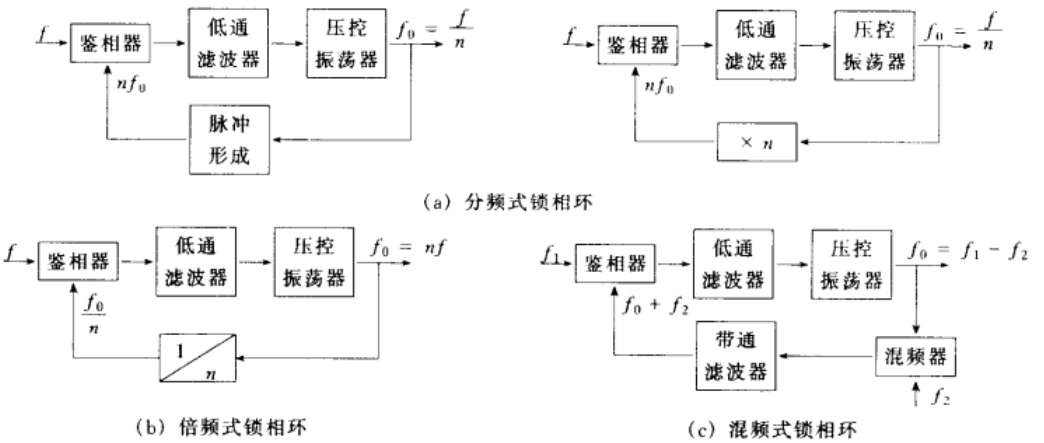


图 2-19　基本锁相环方框图

锁相环路是间接合成法的基本电路，它是完成两个电信号相位同步的自动控制系统。基本锁相环是由鉴相器（PD）、环路低通滤波器（LPF）和电压控制振荡器（VCO）组成，如图 2-19 所示。工作原理是输入信号 U_i 和输出信号 U_o 加到鉴相器上进行相位比较，其输出端的误差电压 U_ϕ 同两信号的瞬时相位差成比例。误差电压经环路低通滤波器滤除其中的高频分量和噪声以后，用以控制压控振荡器，使其振荡频率向输入频率靠拢，直至锁定为止。环路一经锁定，则压控振荡器的频率就等于输入信号的频率。此时，两信号的相位差保持某一恒定值，因而，鉴相器的输出电压自然也为一直流电压，振荡器就在此频率上稳定下来。

图2-20 就是频率合成器中经常使用一些基本锁相环路。图中倍频器的倍频系数 n 或分频器的分频系数 n，能在频率预置时设定，使这些锁相环路中的压控振荡器处于锁相环的捕捉范围内，于是在环路的输出端可得到输入信号的分频、倍频、混频（和频或差频）等信号。



(a) 分频式锁相环

(b) 倍频式锁相环

(c) 混频式锁相环

图 2-20　常用基本锁相环路

实际应用的合成信号发生器往往是多种方案的组合，以解决频率覆盖、频率调节、频率跳步、频率转换时间及噪声抑制等问题。当前合成信号发生器的发展趋势仍是宽频率覆盖、高频率稳定度和准确度、数字化、自动化、小型化和高可靠性。

第六节　电视信号发生器

彩色/黑白电视信号发生器是用来调试、检查、测试和维修黑白、彩色电视机及电视发射台、差转台的信号源。它提供了多种图像测试信号，可以对电视机的主要性能指标进行定性和定量测试。

彩色/黑白电视信号发生器的型号繁多，下面以便携式 PAL 制 CDXF-1VD 型彩色/黑白电视信号发生器为例，做一简介。

一、性能简介

1．面板图

CDXF-1VD 型彩色/黑白电视信号发生器的面板图，如图 2-21 所示。

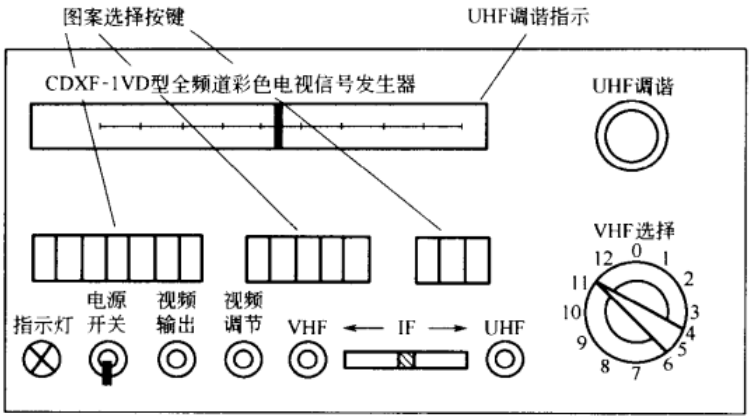


图 2-21　CDXF-1VD 型电视信号发生器面板图

2．基本情况

这种型号的电视信号发生器，非常适合在调试、维修电视机时使用。它可以提供 15 种测试图案（其中有 8 种是彩色的）；还可以用叠加的形式组合图案，所以它实际上可以产生 22 种图案。

该仪器可以从 VHF 和 UHF 输出插孔输出射频信号（1～56 频道）或中频信号（38 MHz）；也可以接上天线后接收电视台的信号。

它还可作为简易的 VHF、UHF 或 IF（中频）调制器使用，发送录像信号和录音信号。

3．技术性能

（1）测试图案

圆：可与棋盘、格、点、十字图案叠加成组合图案的黑底白圆。

棋盘：12×16 黑白交错格。

格子：11 条水平线与 15 条垂直线组成的方格子。

点：11×15 点阵。

十字：一条水平线与一条垂直线组成的十字。

多波群：从左至右为 1～5 MHz 的八级清晰度线。

彩条：标准的 PAL 彩条。

色度：不带亮度信号的彩条。

灰度：从左至右八级线性灰度阶梯。

B-Y：蓝色差信号。

R-Y：红色差信号。

全白面、全红面、全蓝面、全绿面。

红、蓝、绿三基色的单色面相互组合可形成黄、青、紫三种混色的单色面。

（2）行频　15 625 Hz。

（3）场频　50 Hz；隔行扫描。

（4）伴音载频　6.5±0.3 MHz；调频。

内伴音频率：1 kHz±200 Hz，频偏 50 kHz。

外伴音输入幅度＜100 mV。

（5）视频输出　正或负极性全电视（彩条）信号幅度大于 3 V_{P-P}，且连续可调。

（6）射频输出

VHF：1～12 频道，输出幅度大于 50 mV。

UHF：13～56 频道，输出幅度大于 10 mV。

输出阻抗：均为 75 Ω。

（7）中频输出　38±1 MHz，幅度 V_{P-P}大于 500 mV，输出阻抗为 50 Ω。

（8）外视频输入幅度　1 V_{P-P}。

二、使用方法

1．电视信号发生器的使用

CDXF-1VD 型彩色/黑白电视信号发生器，共有 15 个基本测试图案的按键，按下按键即可得到相应的图案。其用途及使用方法见表 2-2。

表 2-2　CDXF-1VD 电视信号发生器的用途及使用方法

图　案	用　　途	使　用　方　法
圆	电视整机线性，扫描几何尺寸	单独按下此键
棋盘	图像宽高比，图像位置和水平、垂直幅度，黑白“阶跃”效应	可单独使用，也可与圆组合使用，且同时按下两键
格子	彩电会聚性能，枕形失真校正，扫描线性	且同时按下两键
点	聚焦特性	
十字	图像几何中心位置	
多波群	电视清晰度	单独按下此键
彩条	彩电整机性能，色同步与副载波再生电路，亮度通道延迟等	单独按下此键
色度	色通道性能，梳状滤波器调整	先按下“彩条”键，再按此键
灰度	亮度、对比度电路，白平衡调整	
红色差(R-Y)	梳状滤波器蓝色差(B-Y)通道调整，解码器调整	
蓝色差(B-Y)	梳状滤波器红色差(R-Y)通道调整，解码器调整	
白色面	亮度是否恒定、一致，显像管电子束电流置定	
红、蓝、绿单色面	色纯度	先按下“彩条”和“白色面”两键，再按相应两键
黄、青、紫混色面		先按下“彩条”和“白色面”两键，再按两个构成混色的基色彩键

2．射频输出

将频段选择开关“VHF←IF→UHF”拨向所需频段，调节“VHF 选择”或“UHF 调谐”至所需频道；把射频输出电缆插入相应的“VHF”或“UHF”插孔，作为向外发射（输出）的天线；电视机就可以接收信号发生器射频信号了（15 个基本测试图案），选用哪一个图案，就按哪一个“图案选择”按键即可。

3．视频输出

将仪器背面的“视频选择”开关置于“内视频”处，并根据需要选择“正、负极性”选择开关，再调节面板上的“视频调节”旋钮，就可以从“视频输出”孔输出全电视信号。用这个信号对黑白电视机的预视放、视放部分及彩色电视机的色度通道部分等处进行检查维修提供了方便。

4．中频输出

将频段选择开关“VHF←IF→UHF”置于“VHF”处，将“VHF 选择”置于“0”位置，这时从“VHF”插孔输出的是 38 MHz 的中频信号；串一个 10～200 pF 的电容器后可输入电视机的中频通道。

将频段选择开关“VHF←IF→UHF”置于“IF”处，可从背面的“中频输出”插孔得到峰-峰值大于 500 mV 的中频信号。

5．伴音输出

将仪器背面的“伴音”开关置于“开”的位置，即可输出 1 kHz 的调频伴音信号。

6．转发外视频信号和外音频信号

将仪器背面的“视频选择”开关置于“外视频”处，外视频信号和外音频信号（录像机、录音机的输出信号）接入相应的“外视频输入”和“外音频输入”插孔，调节“频段选择”开关及“VHF 选择”和“UHF 调谐”，从相应的输出插孔可得到转发的信号。

第七节　脉冲信号发生器

脉冲信号发生器主要是为脉冲电路和数字电路的动态特性的测试提供脉冲信号。如研究限幅器的限幅特性、钳位电路的钳位特性、触发器的触发特性、门电路的转换特性和延迟时间、开关电路的开关速度及数字集成电路和计算机电路时均需要脉冲信号。

脉冲信号是指具有瞬变特性的电流或电压。理想的脉冲波形是矩形的，工程上的脉冲波形可以是多种多样的，如尖脉冲、三角形脉冲、钟形脉冲、编码脉冲和随机脉冲串等。因为各种形状的脉冲信号之间可通过整形电路进行波形变换，所以一般标准的脉冲信号源是以提供各种重复频率和宽度的矩形波脉冲为主。脉冲信号源产生的信号，其重复频率（或重复周期）、脉冲宽度、输出幅度等，在较大的范围内均可调节，且能准确读数；还能输出极性可变的主脉冲和时间上超前于主脉冲的同步脉冲（有的还能输出双脉冲）。根据脉冲信号产生过程的不同，脉冲信号发生器可分为射频脉冲信号发生器和视频脉冲信号发生器两种，而一般常用的是视频脉冲信号发生器。

脉冲信号发生器的基本组成如图 2-22 所示。

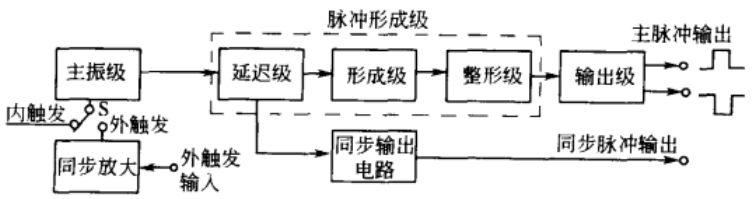


图 2-22　脉冲信号发生器框图

1．主振级

主振级的作用是形成一个频率稳定度高、调节性能良好的周期信号，作为下一级电路的触发信号。主振级一般由多谐振荡器组成，特点是电路简单，频率连续可调，可工作在外触发状态。当“内触发”时，主振级是一个多谐振荡器；当“外触发”时，主振级就相当一个单稳态电路了。

2．延迟级

脉冲信号发生器除了具有主脉冲输出外，一般还要求有“同步”外部设备或仪器的同步脉冲输出，而主脉冲和同步脉冲之间需要有一定的延迟。延迟级就是为完成这种延迟作用而设置的。

3．形成级

脉冲形成级的作用是形成脉冲宽度稳定性好、具有良好宽度调节性能的矩形脉冲波。其宽度一般为 2.5 ns～1 s。脉冲形成级的电路一般采用单稳态触发器和脉冲加、减电路。

4．整形级

为了使输出的脉冲波更趋近矩形，通常要求脉冲波形的前、后沿要陡峭，而整形级能充分改善矩形脉冲的形状并具有电流放大作用。脉冲整形级由电流开关电路组成。而延迟级、形成级、整形级又构成脉冲形成级。

5．输出级

输出级的作用是对输出脉冲信号进行幅度放大，并通过衰减器输出各种脉冲波形。通常包括有脉冲放大器、倒相器等，输出信号的幅度、极性在输出级进行调节。

本 章 小 结

1．低频信号发生器是产生 1 Hz～1 MHz 的正弦波信号。一般用文氏电桥振荡电路做主振级产生正弦信号，通过电压和功率放大，再配以衰减器和阻抗匹配器，以适应不同负载及不同幅度输出信号的需要。

2．高频信号发生器既产生频率较高的正弦信号，亦可对此正弦信号加以调制，使之成为已调波，为高频电子线路调试提供所需的各种模拟射频信号。高频信号发生器用 LC 振荡电路做主振级，可进行内调制，亦可进行外调制。信号经放大后由分压器衰减后输出。

3．函数信号发生器是一种能产生宽频率范围、多波形信号的通用仪器。其输出频率可低至 mHz，高至 MHz，输出信号波形有方波、三角波、正弦波、锯齿波等。通常先产生一种波形，然后用适当的电子线路对之进行转换，产生新的信号波形。仪器内部对较高频率的信号进行调制，可以调幅、调频，亦可以扫频，可以内调制，亦可以外调制。

另外，很多函数信号发生器还带有频率计，用数字方式显示仪器的输出信号频率，亦可测量一定频率范围的输入信号频率，使仪器具有广泛的用途。

4．合成信号发生器是利用频率合成技术而组成的正弦信号发生器。在频率准确度要求较高的场合，用晶振产生的基准信号合成新的所需频率的信号，一般采用间接合成即锁相合成，再配以内插振荡器，产生一定频率范围内连续可调的与晶振频率具有相同稳定度的正弦波信号输出。整个频率合成器相当于普通正弦信号源的主振级。

5．彩色/黑白电视信号发生器，是用来调试、检修黑白与彩色电视机及电视发射台、差转台的专用信号源。它可提供多种图像测试信号，可以对电视机、电视发射台、差转台的主要性能指标进行定性和定量测试。

6．脉冲信号发生器由主振级产生频率可调的方波脉冲，在形成级形成宽度可调的矩形脉冲，通过输出级的脉冲放大器、倒相器等对输出信号的幅度、极性进行调节。



思考题与习题

2-1　低频信号发生器一般由哪几部分组成？各部分的作用是什么？

2-2　XD-22A 型低频信号发生器开机前为什么应将输出电平调节旋钮置于最小值处？

2-3　若把 XD-22A 型低频信号发生器的衰减开关放在 70 dB 处，调节输出细调旋钮使指示电压表的读数分别为 1 V、3 V、6 V，问实际输出电压分别为多少？

2-4　在题 2-3 中，若指示电压表的表针始终指在 5 V 处，而衰减开关分别处于 10 dB、20 dB、50 dB、60 dB 处，问实际输出电压分别为多少？

2-5　简述高频信号发生器的基本组成及各部分功能。

2-6　什么叫合成信号发生器？它与低频、高频信号发生器相比较，其信号的产生有何不同？

2-7　函数信号发生器有何特点？它与前述各种信号发生器相比较，其信号的产生过程有何不同？

2-8　简述由三角波转换成正弦波的二极管成形网络的工作原理。

实训参考方案

低频信号发生器的使用

一、实训目的

1．掌握低频信号发生器的基本使用方法。

2．利用低频信号发生器进行实际测量。

二、实训器材

1．XD-22A 型低频信号发生器

2．DA-16 型电子电压表

3．500 型万用表

三、实训内容及步骤

1．XD-22A 型低频信号发生器的基本使用。

（1）将 XD-22A 型低频信号发生器的输出端与 DA-16 型电子电压表的输入端相连。

（2）将 XD-22A 型低频信号发生器的输出衰减开关置于“0 dB”处，并调节输出细调旋钮使指示电表的表针指到 6 V（实际过程中始终保持）处，再调节输出频率分别为 50 Hz、100 Hz、1 kHz、100 kHz、500 kHz（以上均为正弦波），同时用 DA-16 型电子电压表分别测出相应的电压值，填入表 2-3。

表 2-3　XD-22A 型低频信号发生器的基本使用

衰减分贝值/dB		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
XD-22A 输出 6 V/衰减倍数/V											
DA-16 型电子电压表读数	50 Hz										
	100 Hz										
	1 kHz										
	100 kHz										
	500 kHz										

（3）再把 XD-22A 型低频信号发生器的衰减开关置于：10 dB、20 dB、30 dB、40 dB、

50 dB、60 dB、70 dB、80 dB、90 dB。重复上面测试过程。

2. 利用 XD-22A 型低频信号发生器测试 500 型万用表交流 5 V 挡的频率特性。

将 XD-22A 型低频信号发生器、500 型万用表和 DA-16 型电子电压表按图 2-23 所示的方法连接好。

① 将 500 型万用表置于交流 5 V 挡。

② 将 XD-22A 型低频信号发生器的衰减开关置于“0dB”处，调节输出旋钮，使之维持 5 V 输出，并用 DA-16 型电子电压表监测。

③ 调节 XD-22A 型低频信号发生器的输出频率如表 2-4 所示，同时读出 500 型万用表的读数。

表 2-4　万用表频率特性测试表

输入信号频率	50 Hz	100 Hz	500 Hz	1 kHz	5 kHz	10 kHz	50 kHz	100 kHz	500 kHz
交流 5 V 挡读数									

④ 以 500 型万用表的交流电压读数为纵轴，XD-22A 型低频信号发生器的输出频率为横轴，作出 500 型万用表的 5 V 交流挡的频率特性曲线，如图 2-24 所示。

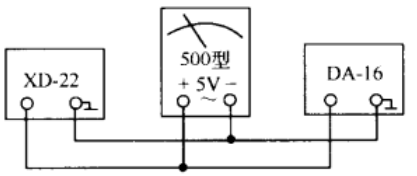


图 2-23　测量万用表的频率特性



图 2-24　频率特性曲线

第三章　示 波 测 量



目的与要求　示波器是一种测量、观察、记录用的仪器，它以直观、准确、简便的特点广泛被应用。本章应着重掌握通用示波器、晶体管特性图示仪的基本原理和正确使用。

第一节　概　　述

电子示波器简称“示波器”，是一种用来观察电量随时间变化过程的仪器。随着电子技术的不断发展，示波器不仅能对电信号作定性的观察，还能进行定量的测定。例如，进行各种电信号的电压、频率、相位、周期等电量的测量。现代示波器还具有直读数字数据的测量功能。目前，示波器已成为广泛用于科学实验与产品的研发、生产、维修中的“万用仪器”。此外，在许多尖端设备和仪器中，例如：雷达、频谱分析仪、时域反射计、时域网络分析仪等，示波器已成为必备的组成部分。

示波器是一种用来显示某一输入信号与时间关系的快速 X-Y 记录器。为了完成 X-Y 高速记录器的功能，示波器必须具有许多相应的电子部件。例如：在 X 方向必须有随时间变化的锯齿波发生器及 X 放大器等水平道信系统；在 Y 方向必须有放大或衰减输入信号的垂直道信系统等。

示波器的种类很多，分类方式亦不相同。按结构来分，有便携式、台式和架式；按观察显示时间来分，有实时示波器和非实时示波器；按使用的示波管来分，有单线式、双线式、多线式示波器、记忆示波器、行波示波器；按功能来分，有通用示波器、宽带示波器、存储示波器、取样示波器、电视示波器、逻辑示波器等。

本章着重分析通用示波器，简介其他示波器及一些应用。

第二节　示波管及波形显示原理

示波器将电信号波形转换成人眼能够观察的图像，是通过其核心部件示波管来实现的。

一、示波管

示波管是电子示波器的显示器件，也是示波器的心脏。近来，虽然许多新型的光显示器件有了很大的发展，例如：电发光阵、砷化镓二极管固态光发射阵、液晶离子器件等。但目前，电子射线管（CRT）仍然是示波器的重要显示器件。

示波管按不同方法分类，可分为许多类型。例如，按电子射线偏转方法不同，分为磁偏转型和静电偏转型，后者为目前示波器的常用显示器件；按射线数目又分为：单线、双线和多线显示管。另外，可按显示余辉时间长短分为：标准余辉、存储型和可变余辉等。

图 3-1 是静电偏转型电子射线示波管的结构原理图。从图中可看出，示波管主要由三部分组成：电子枪、静电偏转系统和荧光屏。

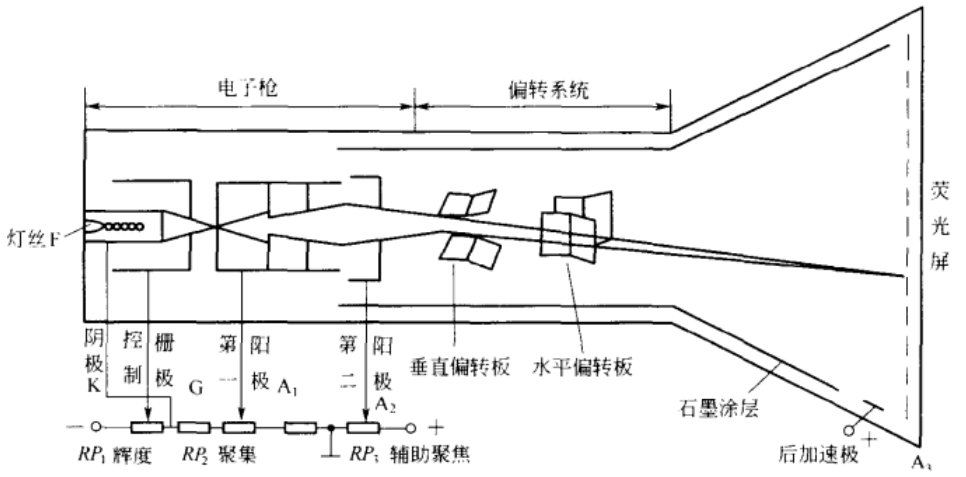


图 3-1　示波管结构示意图及供电电路

1．电子枪

电子枪由灯丝（F）、阴极（K）、控制栅极（G）、第一阳极（A_1）、第二阳极（A_2）和后加速极（A_3）组成。其作用是发射电子并形成很细的高速电子束，撞击荧光屏而发光。灯丝用于加热阴极，阴极提供热电子发射所产生的电子。控制栅极则用来控制射向荧光屏的电子流密度，从而改变荧光屏亮点的辉度。调节电位器 RP_1 改变栅、阴极之间的电位差，即可达到此目的，故 RP_1 在面板上的旋钮标以“辉度”。

第一阳极和第二阳极对电子束有加速作用，同时和控制栅极构成一个对电子束的控制系统，起聚焦作用。调节 RP_2 可以改变第一阳极的电位，调节 RP_3 可以改变第二阳极的电位，适当调节 RP_2 和 RP_3，可使电子束恰好在荧光屏上会聚成细小的点，保证显示波形的清晰度。依次把 RP_2 和 RP_3 分别称为“聚焦”和“辅助聚焦”电位器。

需要指出的是，在调节“辉度”时会使聚焦受到影响，因此，示波管的“辉度”与“聚焦”并非相互独立，而是有关联的。在使用示波器时，这两者经常要配合调节。

后加速极 A_3 位于荧光屏与偏转板之间，其作用是对电子束作进一步加速，增加光迹辉度。

2．偏转系统

示波管中，在第二阳极的后面，由两对相互垂直的偏转板组成偏转系统，Y 轴偏转板在前（靠近第二阳极），X 轴偏转板在后。两对偏转板各自形成静电场，分别控制电子束在垂直方向和水平方向的偏转。

电子束在偏转电场作用下的运动规律可用图 3-2 来分析，其在屏幕上偏转的距离 y 可由式（3-1）来表示。

$$y = s_y u_y (\text{cm}) \tag{3-1}$$

式中　s_y——示波管 Y 轴偏转灵敏度；

u_y——加于 Y 轴两偏转板上的电压，V。

s_y 的单位为 cm/V，表示加在 Y 轴偏转板上的每伏电压所能引起的偏转距离。对于确定的示波管，s_y 是常数，所以，电子束在屏幕上偏转的距离正比于加到偏转板上的电压。这是示波器测量方法的理论基础。

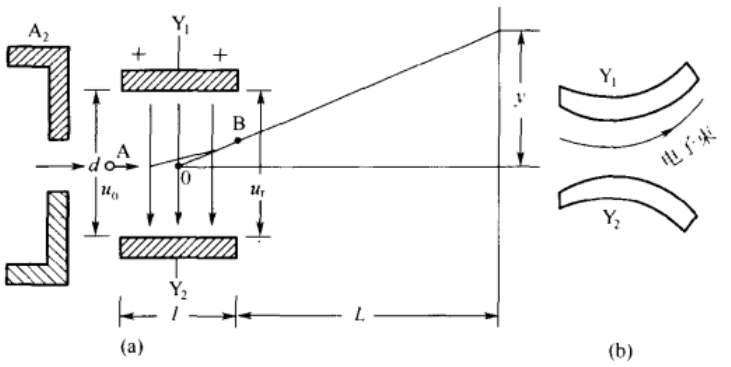


图 3-2　电子束偏转规律

通常，称 s_y 的倒数 $D_y\left(=\frac{1}{s_y}\right)$ 为示波管 Y 轴偏转因数，单位为 V/cm。它表示光点在 Y 轴方向偏转 1 cm 所需加在 Y 轴偏转板上的电压值（峰-峰值）。

3．荧光屏

示波管的屏幕是在它的管面内壁涂上一层磷光物质来形成的。这种由磷光物质组成的荧光膜在受到高速电子轰击后，将电子的动能转化为光能，形成光点，并出现余辉时间（从电子束停止作用到光点亮度下降到其原始值的 10% 所延续的时间称为余辉时间）。正是利用荧光屏的余辉，当电子束随信号电压偏转时，才能观察到由光点的移动轨迹而形成的整个信号波形。示波管按余辉时间可分为：短余辉（小于 1 ms）示波管，中余辉（1～100 ms）示波管，长余辉（大于 100 ms）示波管。

观察高速信号时，一般使用短余辉示波管。如使用长余辉示波管反而会模糊不清。在医疗、生物及雷达方面，常使用长余辉管。一般通用的示波器上，则用中余辉示波管。示波管发出的荧光和磷光的颜色大体相同，通常是绿色或蓝色。前者用于目视，后者用于摄影。

当高速电子束轰击荧光屏时，其动能除转变为光外，也将产生热。所以，如过密的电子束长时间集中于屏幕同一点时，由于过热会减弱磷光质的发光效率，严重时可能把屏幕上的这一点烧成一个黑斑。所以在使用示波器时不应当使亮点长时间停留于一个位置。

荧光屏中间平整部分称为有效面积。一般，矩形荧光屏较之圆形荧光屏平整，有效面积较大。使用示波器，应尽量使波形映现在有效面积内。

为了定量地进行电压大小和时间长短的测量，在荧光屏的外边加一块用有机玻璃制成的外刻度片，标有垂直和水平方向的刻度。近年来又将分度刻在荧光屏玻璃的内侧，称为内刻度片，它可以消除波形与刻度片不在同一平面上造成的视觉误差。

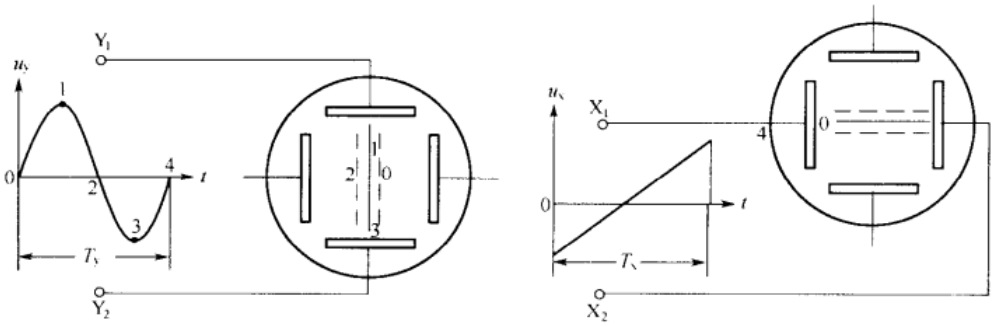
二、波形显示原理

1．示波器显示是电子束受 u_y 和 u_x 共同作用的结果

示波器之所以能用来观测信号波形是基于示波管的线性偏转特性，即电子束（从观测效果看，亦即屏幕上的光点）的偏转距离正比于加到偏转板上的电压大小。电子束沿水平和垂直方向上的运动是相互独立的，打在荧光屏上亮点的位置取决于两副偏转板上的电压。当两副偏转板上不加任何信号（或分别为等电位）时，亮点则处于荧光屏的中心位置。

当只有 Y 轴偏转板上加一个随时间作周期性变化的被测电压，则电子束沿垂直方向运

动，其轨迹为一条垂线。若只在 X 轴偏转板上加一个周期性电压，则电子束运动轨迹为一条水平线。这两种情况分别见图 3-3（a）和（b）。



(a) 只加 u_x 显示竖直线　　(b) 只加 u_x 显示水平线

图 3-3　只加 u_x 或 u_y 时荧光屏上波形

被测电压是时间的函数，对应于每一时刻，它都有确定的值与之相对应。要在荧光屏上显示被测电压波形，就要把屏幕作为一个直角坐标，其垂直轴作为电压轴，水平轴作为时间轴，使电子束在垂直方向偏转距离正比于被测电压的瞬时值，沿水平方向的偏转距离与时间成正比，也就是使光点在水平方向做恒速运动。要达到此目的，就必须在示波管的 X 轴偏转板上加随时间线性变化的扫描锯齿波电压，称之为扫描电压。

2．扫描

当扫描电压达到最大值时，亮点即达最大偏转，然后从该点返回到起始点。若扫描电压重复变化，在屏幕上就显示一条亮线，这个过程称为“扫描”。亮点由左边起始点到达最右端的过程称为“扫描正程”，而迅速返回扫描起始点的过程称为“扫描回程”或“扫描逆程”。理想锯齿波的回程时间是零。

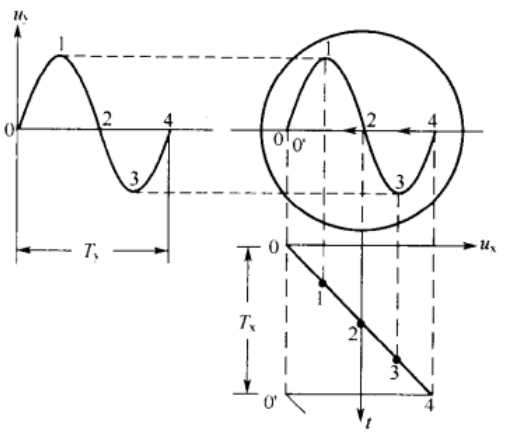


图 3-4　显示波形原理

在 X 偏转板有扫描电压作用的同时，若在 Y 偏转板上加被测信号电压，就可以将其波形显示在荧光屏上。如图 3-4 所示。被测电压 u_y 的周期为 T_y，如果扫描电压的周期 T_x 正好等于 T_y，则在 u_y 与 u_x 的共同作用下，亮点的光迹正好是一条与 u_y 相同的曲线（在此为正弦曲线），亮点从 0 点经 1、2、3 至 4 点的移动为正程。从 4 点迅速返回 0 点的移动为回程。回程的光迹为连接 4 点、0 点的直线。为了使显示的波形清晰，需将回程形成的光迹隐去。

由于扫描电压 u_x 随时间作线性变化，所以屏幕的 X 轴就成为时间轴。亮点在水平方向偏转的距离大小代表了时间的长短，故称扫描线为时间基线。若扫描正程线性不佳将影响波形疏密，扫得快时波形扩展，扫得慢时波形压缩。

3．同步

上述是 $T_x = T_y$ 的情况。如果是 $T_x = 2T_y$，则在荧光屏上显示如图 3-5 的波形。由于波形多次重复出现，而且重叠在一起，所以可观察到一个稳定的图像。

如果 T_x 不是 T_y 的整数倍，会有什么结果呢？若 T_x 略大于 T_y，于是在一个 T_x 时间内显示一个正弦波多一点，如图 3-6 所示。第二个 T_y 时，亮点从 A 跳到 B，画出第二个正弦波后从 C 跳到 D……如此，将看到波形向左移。反之若 T_x 略小于 T_y，波形将向右移动。

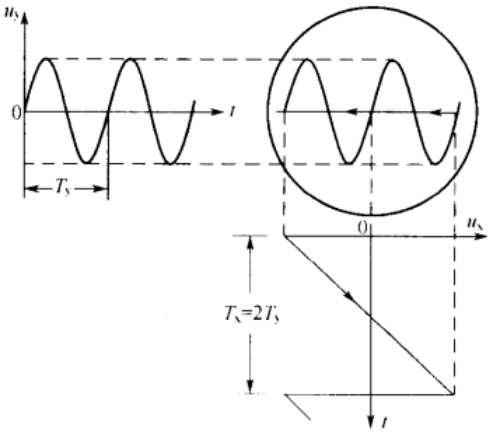


图 3-5　$T_x=2T_y$ 时显示波形

至此，可得到稳定显示一个波形的条件：第一，待测信号 u_y 为频率 f_y 稳定的周期性信号。第二，u_x 为频率 f_x 稳定的锯齿波电压。第三，$f_y=nf_x$（n 为正整数）。满足这三个条件称为同步，它依靠同步电路进行自动调节。同步有三种方式，用待测信号去控制扫描频率称为内同步。用 50 Hz 市电去控制扫描频率称为电源同步，显然，此时待测信号频率应与电源有关。用与有关的第三个信号去控制称为外同步。

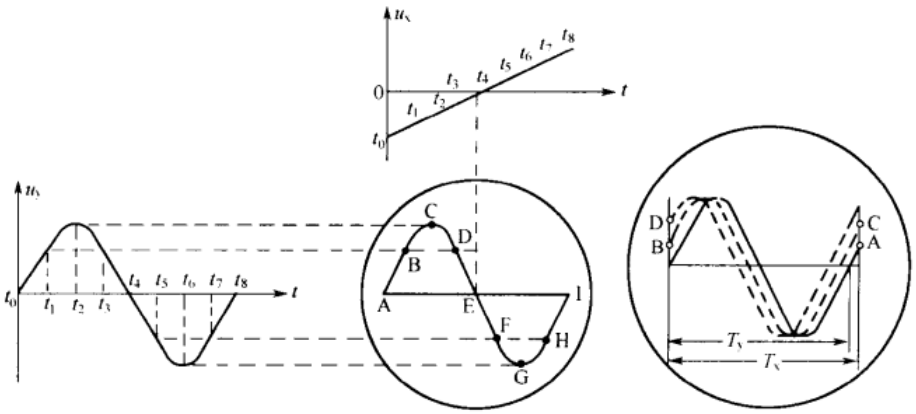


图 3-6　不同步波形

总之，电子束在被测电压与同步扫描电压的共同作用下，亮点在荧光屏上所描绘的图形反映了被测信号随时间的变化过程，当多次重复就构成稳定的图像。

第三节　通用示波器

一、通用示波器的组成

通用示波器是示波器中应用最广泛的一种。它通常泛指采用单束示极管的、除取样示波器及专用或特殊示波器以外的各种示波器。

虽然通用示波器的种类繁多，但其组成部分都应包括图 3-7 所示的几个组成部分。

1．Y 轴系统（垂直系统）：由衰减器、放大器及延迟线等组成。其主要作用是放大被测信号电压，使之达到适当幅度，以驱动电子束作垂直偏转。

2．X 轴系统（水平系统）：由触发整形电路、扫描发生器及 X 放大器组成。其作用是

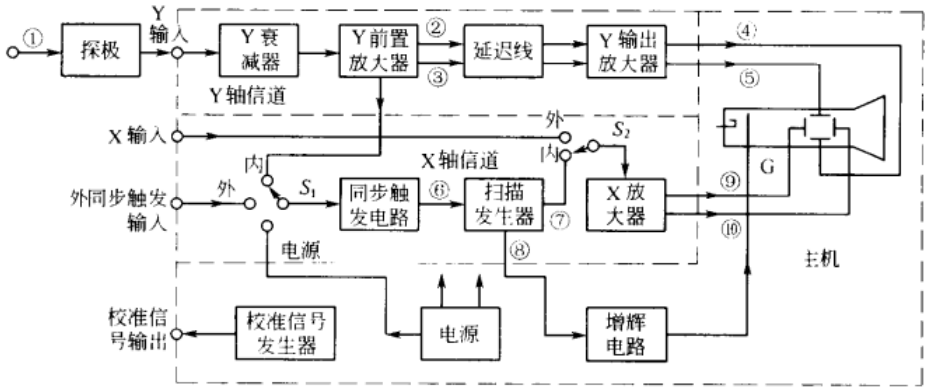


图 3-7　示波器的基本组成框图

产生扫描锯齿波并加以放大，以驱动电子束进行水平扫描；触发整形电路则保证荧光屏上显示的波形稳定。

3. 主机系统：主要包括示波管、增辉电路、电源和校准信号发生器。增辉电路的作用是在扫描正程使光迹加亮，而在扫描回程使光迹消隐。电源电路将交流市电变换成多种高、低压电源，以满足示波管及其他电路工作需要。校准信号发生器则提供幅度、周期都很准确的方波信号，用作校准示波器的有关性能指标。示波管的作用前已叙述。

二、示波器的垂直通道

用示波器观测信号时，欲使荧光屏显示的波形尽量接近被测信号本身具有的波形，则要求 Y 系统必须准确地再现输入信号。Y 通道要探测被测信号，并对它进行不失真的衰减和放大，还要具有倒相作用，以便将被测信号对称地加到 Y 偏转板。另外为了和 X 轴系统相配合，Y 轴系统还应具有延时功能，并能向 X 通道提供内触发源。因此它必须具有以下组成，如图 3-8 所示。

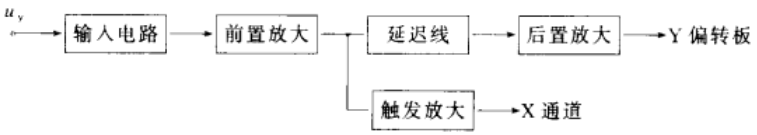


图 3-8　Y 通道基本组成

（一）输入电路

其基本作用是引入被测信号，为前置放大器提供良好的工作条件。并在输入信号与前置放大器之间起阻抗变换、电压变换的作用。

输入电路必须具有适当的输入阻抗、较高的灵敏度、大的过载能力、适当的耦合方式，尽可能靠近被测信号源，一般采取平衡对称输出。输入电路的组成如图 3-9 所示。

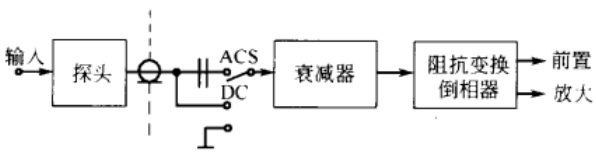


图 3-9　输入电路方框图

1. 输入衰减器

输入衰减器用来衰减输入信号，以保证显示在荧光屏上的信号不致因过大而失真。它常由 RC 电路组成，其原理示意图如图 3-10 所示。

衰减器的衰减量为输出电压 u_o 与输入电压 u_i 之比，也等于 R_1C_1 的并联阻抗 Z_1 与 R_2C_2 的并联阻抗 Z_2 的分压比。其中

$$Z_1=\frac{R_1/\!/\frac{1}{j\omega C_1}}{R_1+\frac{1}{j\omega C_1}}=\frac{R_1}{1+j\omega C_1R_1}$$

$$Z_2=\frac{R_2/\!/\frac{1}{j\omega C_2}}{R_2+\frac{1}{j\omega C_2}}=\frac{R_2}{1+j\omega C_2R_2}$$

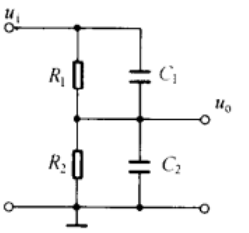


图 3-10　输入衰减器原理示意图

当满足

$$R_1C_1=R_2C_2 \tag{3-2}$$

时，Z_1、Z_2 表达式中分母相同，则衰减器的分压比

$$\frac{u_o}{u_i}=\frac{Z_2}{Z_1+Z_2}=\frac{R_2}{R_1+R_2} \tag{3-3}$$

这时分压比与频率无关。组成衰减器的电容亦可有一定的调节范围，只要调整到满足式（3-2）的关系，分布电容的影响就可不予考虑。满足式（3-2）的情况为最佳补偿。

示波器的衰减器实际上由一系列 RC 分压器组成，改变分压比即可改变示波器的偏转灵敏度。这个改变分压比的开关即为示波器灵敏度粗调开关，在面板上常用 V/cm 标记。例如 SBM-10A 型示波器的灵敏度就是从 0.05～20 V/cm 分 9 挡步进衰减的。

2. 倒相放大器把单端输入信号转换成平衡输出，以便于进行高增益宽带直流放大。目前示波器 Y 通道的频率下限大都为直流，零点漂移是直流放大器的重要技术指标。为了减小零点漂移，Y 通道中的放大器都用平衡式放大电路，这就需要把单端输入信号转换成平衡输出。

（二）延迟线

在前面讨论触发扫描时已经介绍，开始扫描需要一定的电平，因此扫描的开始时间总是滞后于被观测脉冲一段时间 t_p，如图 3-11 所示。其结果，脉冲的上升过程就无法被完整地显示出来，因为有一段时间扫描尚未开始。

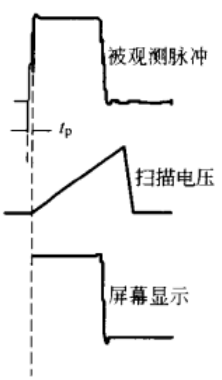


图 3-11　没有延迟线时的情况

延迟线的作用就是把加到垂直偏转板的脉冲信号也延迟一段时间，使信号出现的时间滞后于扫描开始时间，这样就能够保证在屏幕上可以扫出包括上升时间在内的脉冲全过程。

通用示波器的延迟时间范围一般为 60～200 ns。对延迟时间的准确度没有严格要求，但延迟时间要稳定，否则会产生图像在水平方向的漂移或晃动现象。延迟线应有足够宽的频带和良好的频率特性，以便无失真的传送被测信号。延迟线有分布参数和集中参数两种，前者频带宽，适用于高频示波器，后者频带窄，适用于低频示波器。

（三）Y 放大器

通常把 Y 放大器分成前置放大器和输出放大器两部分。前置放大器的输出信号一方面引至触发电路，作为同步触发信号；另一方面经过延迟线延迟以后引至输出放大器。这样就使加在 Y 偏转板上的信号比同步触发信号滞后一定的时间，保证在荧光屏上可看到被测脉冲的前沿。

输出放大器的输出信号加到 Y 偏转板，使电子射线获得足够的垂直偏转。输出放大器中设有一个短路器，它可大大降低通道的增益和直流电平。接通短路器，可把超出屏幕的波形拉回到屏幕上，以便使测量者找到波形的位置。控制这个短路器的开关称为“寻迹”。

三、示波器的水平通道

示波器水平通道的主要任务是：产生并放大一个与时间成线性关系的电压，该电压使电子束沿水平方向随时间线性偏移，形成时间基线；能选择适当的触发或同步信号，并在此信号作用下产生稳定的扫描电压，以确保显示波形的稳定；能产生增辉或消隐信号，去控制示波器的 Z 通道。

为了完成上述功能，现代通用示波器的 X 通道最少包括如图 3-12 所示的扫描发生器环、触发电路和 X 放大电路。

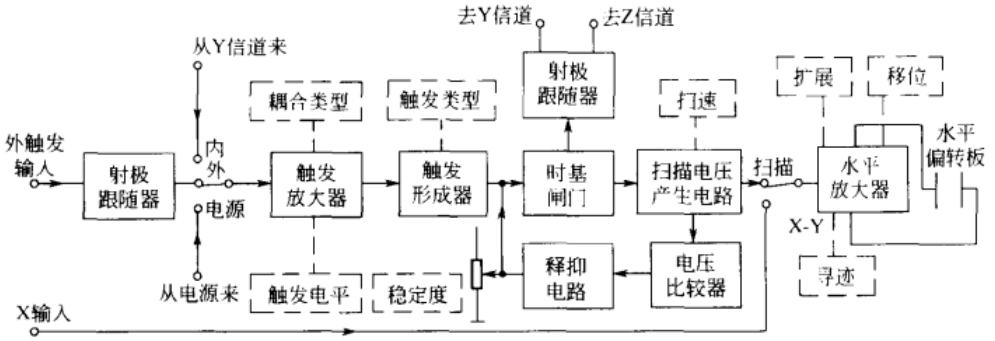


图 3-12　水平系统方框图

（一）扫描发生器环

扫描发生器环也称为时基电路，它是 X 通道的核心。其作用是产生一个与时间呈线性关系的扫描电压。为了在屏幕上稳定地显示信号波形，时基电路产生的扫描电压必须与被测信号同步。

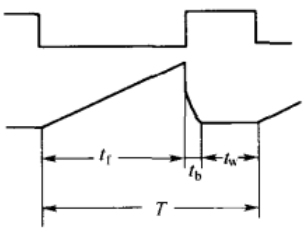


图 3-13　扫描发生器波形图

扫描发生器环，其所以称之为“环”，是由于组成它的时基闸门、扫描发生器、电压比较器和释抑电路组成一个闭合环路。

1．扫描发生器

扫描发生器是一种锯齿波产生器，目前多采用线性极好的密勒扫描发生器。它的输入是来自时基闸门的负脉冲，其周期为 T，宽度为 t_f，输出是周期为 T 的锯齿波。图 3-13 是扫描发生器的输入输出波形。图中

$$T = t_f + t_b + t_w$$

式中　t_f——扫描正程或扫描时间，在这段时间内．屏幕上的光点按选定的速度，从左向右匀速移动；

t_b——扫描回程，在这段时间内光点迅速地从右端返回左端，由于消隐信号抑制了电子射线，屏幕上没有光迹；

t_w——等待时间，在这段时间内，扫描发生器等待下一次触发。

2．时基闸门

时基闸门的输出信号一方面控制扫描发生器，另一方面作为消隐脉冲送至示波器调辉通道，使荧光屏只在扫描正程出现光迹。此外，闸门输出脉冲前沿经微分，送给 Y 通道的通道转换器作为交替方式的转换触发信号。

示波器的时基闸门一般采用图 3-14 是所示的施密特电路（射极耦合双稳电路），该电路

具有下述特性：当 VT_1 的基极电平 u_{b1} 高于上触发电平 E_1，即 $u_{b1} > E_1$ 时，VT_1 导通（VT_2 截止）；当 u_{b1} 低于下触发电平 E_2，即 $u_{b1} < E_2$ 时，VT_1 截止（VT_2 导通）；当 $E_1 > u_{b1} > E_2$ 时，电路维持原来的工作状态。如果调节电位器 RP，使时基闸门的预置电平 E_0 处在 E_1 和 E_2 之间，并假定起始状态 VT_2 截止。当负触发脉冲来到时，电路翻转，VT_2 导通。当触发脉冲结束后，u_{b1} 回到 E_0 电平，这时该电路保持转换后的状态，即 VT_2 导通。

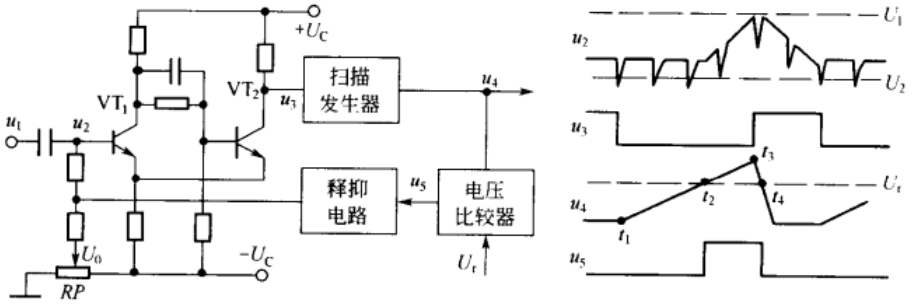


图 3-14　施密特电路作时基闸门

3．电压比较器和释抑电路

电压比较器和释抑电路是确定扫描电压幅度及其稳定性的主要电路。无论扫描电压的起始时刻是谁作用的结果，扫描电压的终止时刻都主要由电压比较器和释抑电路决定。示波器采用的电压比较器有二极管电压比较器、电流开关式比较器等。

释抑电路能保证每一次扫描都从同样的电平开始，使屏幕上显示出稳定的波形。时基闸门一旦被触发，释抑电路就抑制触发脉冲对时基电路的触发作用，直到这次扫描全过程结束，即扫描电压回到起始电平后，释抑电路才释放时基闸门。示波器的释抑电路虽各种各样，但都是利用电容器充放电完成释抑功能，其工作过程可用图 3-14 说明。

当 $t = t_1$ 时，时基闸门输出低电平，扫描正程开始。

当 $t = t_2$ 时，扫描电压正程到达参考电压，比较器输出从低电平转换为高电平。释抑电路的电容器开始充电，释抑电路输出电压上升。

当 $t = t_3$ 时，释抑电路输出电压上升到时基闸门的上触发电平，使时基闸门关闭，扫描电压正程结束，回程开始，在回程期间，特别是回程开始段，扫描电压下降很快。经过时间 t_h，回到起始电平。

当 $t = t_4$ 时，扫描电压下降到比较电压 U_r（忽略比较器的电压回差），比较器输出电压从高电变为低电平。由于释抑电路中的电容放电较慢，经过释抑时间 t_h，回到顶置电平 U_0。这样释抑电路就抑制了触发脉冲对时基闸门的触发作用，保证扫描发生器有足够的放电时间，使每一次扫描都从同样的电平开始。

4．扫描发生器环的工作原理

扫描方式分两种：触发扫描和连续扫描。它们的工作原理可用图 3-15 说明。

（1）触发扫描　触发扫描又称常态扫描，其工作过程见图 3-15（b）。为了使扫描发生器环工作在触发扫描方式，应当把时基闸门的预置电平 U_0 调节在上、下触发电平 U_1 和 U_2 之间。U_0 越靠近 U_2，触发灵敏度越高。

$t = t_1$ 时，第一个触发脉冲打开时基闸门，时基闸门输出由高电平转为低电平，扫描发生器开始扫描正程。扫描电压加至 X 放大器，同时送入电压比较器。

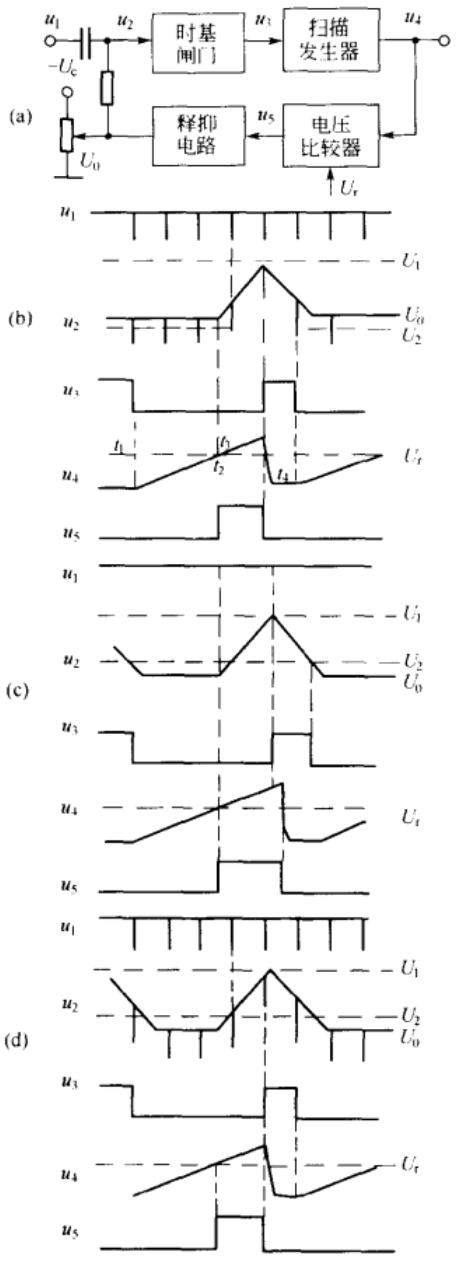


图 3-15　扫描发生器环工作原理

$t = t_2$ 时，扫描电压上升到比较电压 U_r，比较器输出变为高电平，并对释抑电路的电容充电，释抑电路输出电压逐渐上升。此时，扫描电压正程仍在继续。

$t = t_3$ 时，释抑电路输出电压上升到时基闸门的上触发电平 U_1，时基闸门翻转，输出变为高电平，使扫描电压正程结束，回程开始。

$t = t_4$ 时，扫描回程电压 u_4 迅速下降，当 $u_4 - U_r$ 时，比较器输出变为低电平，释抑电路充电结束，放电开始。此后扫描电压迅速下降到起始电平，而择抑电路输出较慢的回到预置电平 U_0。

在扫描电平回到起始电平之前，时基闸门的输出电平（预置电平、释抑电路输出电压、触发脉冲三者的叠加）应低于下触发电平 U_2 以保证每次扫描从同样电平开始。

（2）连续扫描　连续扫描又称自动扫描。当预置电平 U_0 低于下触发电平 U_2 时，扫描发生器环就工作在连续扫描方式。这种方式下，总有扫描电压。其工作过程与触发扫描大致相同，所不同的是扫描不是在触发脉冲的作用下开始。当无同步信号时，释抑电路输出电压下降到下触发电平 U_2 时，扫描开始。这样在没有同步信号时，仍有扫描电压。其工作过程见图 3-15（c）。有同步信号时，工作过程见图 3-15（d）。

在连续扫描时，为了得到稳定的波形要求扫描周期 T 为被测信号周期的整数倍。为此有两种办法：其一，可利用“扫速微调”旋钮来改变扫描速度，从而改变扫描周期，使 $T_x = nT_y$。但这时扫描速度不能准确读数，不便于时间、频率测量；其二，把“扫速微调”处于“校正”位置，这时扫描速度一定，可调节电位器 RP 适当改变释抑时间从而达到改变扫描周期的目的。这种方法在观测高频信号时尤为实用。因此电位器 RP 叫做“稳定度”调节。当有同步信号时，其工作过程如图 3-15（d）所示。由图可见，它与触发扫描类似，时基闸门的输入电压是预置电平、释抑电路输出和同步脉冲的叠加，当三者总电平低于下触发电平 U_2 时，时基闸门打开，扫描正程开始，因此扫描周期必然是同步信号周期的整数倍。

（二）触发电路

触发信号来源不同，其频率、幅度、极性和波形就各不相同，如何把这些形形色色的触发信号变成扫描发生器环所需要的触发脉冲，这就是触发电路的主要功能。

触发电路包括外触发输入跟随器、触发信号放大器、触发脉冲形成器，以及和它相联的触发源

选择开关、耦合方式选择开关、触发方式选择开关、触发极性选择开关和触发电平调节电位器。

外触发输入跟随器增加输入阻抗，减小对外触发源的影响。触发信号放大器对触发信号进行电压放大，以提高触发信号前沿的陡度，减小触发延时。触发脉冲形成器把触发信号变成一个前沿陡峭、宽度适当的脉冲。

1．触发源的选择

触发源包括内触发、外触发和电源触发。内触发信号来自 Y 通道，它能使扫描电压与被测信号同步。内触发是最常用的触发源。电源触发信号来自示波器内部电源引出的 50 Hz 工频电压，它适于观测与工频电压相关的各种信号。

2．耦合方式选择

触发信号送入触发放大器有两种耦合方式：直流耦合和交流耦合。在触发扫描，内触发、直流耦合时，若调节作为触发信号的那路波形的 Y 位移，则波形起点随之改变。当位移调节过大时，可能停止扫描。在交流耦合中，有高频抑制和低频抑制两种耦合方式。在高频抑制状态，触发信号中的高频分量被抑制，从而削弱了高频噪声对触发的影响。在低频抑制状态，触发信号的低频分量被抑制，从而削弱了低频干扰对触发的影响。当然，频率的高低是相对的，在带宽不同的示波器中，高频或低频抑制的范围是不同的。

3．触发方式选择

触发方式有常态、自动、单次、电视等。

在“常态”扫描方式，当没有触发信号时，扫描发生器不工作，屏幕上只有一个光点；当有适当幅度的触发信号输入时，扫描发生器能在触发信号激励下产生扫描。

在“自动”扫描方式，当没有同步信号时，扫描发生器呈振荡状态，屏幕上有时间基线，这便于观测和校准时间基线在屏幕上的位置。当有同步信号时，扫描发生器按同步方式工作。“自动”扫描方式不宜观测脉冲信号和频率很低的信号。

在“单次”触发方式，扫描发生器只能在触发信号激励下产生一次扫描，然后处于闭锁状态，不再接受触发信号。如需进行第二次扫描，必须先恢复扫描发生器为等待状态。单次触发用来观测单次瞬变信号和非周期信号。

“电视”触发方式用来观测电视信号。为了测试电视设备，目前很多示波器有“电视”触发功能。电视信号比较特殊，它是由场同步、行同步、图像信号等组合而成。为了在示波器上稳定地显示出电视信号的波形，示波器的扫描发生器必须和场同步脉冲或行同步脉冲同步，而不能让随机性的图像信号干扰扫描发生器的工作。对于具有“电视”触发功能的示波器，它的触发脉冲产生器除具有一般示波器的触发功能外，还具有两个功能：其一，不让图像信号进入触发脉冲发生器；其二，能从电视信号中分离出场同步脉冲或行同步脉冲。

4．触发极性和触发电平的选择

触发极性和触发电平的选择用来在触发信号波形的哪一点上产生触发脉冲。所谓触发极性是指触发点斜率极性，它是指触发点位于触发信号的上升段还是下降段。若为上升段则为正极性（正斜率）触发，若位于下降段，则为负极性（负斜率）触发。所谓触发电平是指触发点位于触发信号波形的哪一点电平。触发极性选择和触发电平调节对显示周期性连续信号（如正弦波、方波、三角波等）没有明显的意义，但对于显示脉冲信号或只显示周期性连续信号的某一段时，是很有用的。

（三）X 放大器

X 放大器把扫描发生器输出的扫描电压或从示波器 X 轴输入端送来的信号进行放大后

加到 X 偏转板上，使电子射线获得足够的水平偏转。调节 X 放大器的直流电平可使荧光屏上的波形水平移动，称为水平“移位”。

与 Y 放大器类似，改变 X 放大器的增益可以使光迹在水平方向得到若干倍的扩展，或对扫描速度进行微调，以校准扫描速度。

由以上讨论的通用示波器基本组成可以看出，Y 通道主要是一个放大器，通常是用来放大被观测的信号的。在常见的用示波器观测随时间变化的波形时，X 通道的主要任务是产生一个与被测信号同步的，既可以连续扫描又可以触发扫描的锯齿波电压。但是 X 放大器亦可直接输入一个任意信号，这个信号与 Y 通道的信号共同决定荧光屏上光点的位置，构成一个 X-Y 图示仪，这时触发电路和扫描发生器环不起作用。

第四节　XJ4362 型双踪示波器

XJ4362 是一种双踪双扫描便携式通用示波器。带宽 100 MHz，垂直偏转因数从 5 mV/div 到 5 V/div，在全通带范围内触发系统稳定触发，并设有自动电平锁定功能，扫描速度范围 50 ns/div～0.2 s/div，经×10 扩展，最高扫速可达 5 ns/div。

一、主要技术指标

（一）Y 轴系统

① 偏转因数：5mv/div ～ 5v/div，按 1—2—5 分为 10 挡，误差≤±5%。

② 频带宽度：AC 10 Hz～100 MHz，－3 dB；DC 0～100 MHz，－3 dB。

③ 上升时间＜3.9 ns。

④ 输入阻抗：输入电阻 1 MΩ±5%，电容 22 pF±5 pF。

⑤ 工作方式 CH_1、CH_2、CH_1CH_2（交替或断续）及 $CH_1 \pm CH_2$。

⑥ 最大输入电压：400 V（$DC + AC_{P-P}$）。

（二）X 轴系统

① 扫描显示方式：A 扫描、B 扫描、A/B 交替扫描。

② 扫描工作方式：自动、触发、单次、TV、X-Y。

③ 触发源：内、CH_1、CH_2、垂直方式、电源、外。

④ 耦合方式：内 DC、外 AC（最低耦合频率≥5 Hz）。

⑤ 触发方式：常态、自动电平锁定。

⑥ 外触发最大输入电压 160 V（$DC + AC_{P-P}$）。

⑦ 扫描时间因数范围与误差

A 扫描：50 ns/div～0.2 s/div，按 1-2-5 进制分 21 挡，误差不超过±5%。

B 扫描：50 ns/div～20 ms/div，按 1-2-5 进制分 18 挡，误差不超过±5%。

（三）主机部分

① 增辉电压与极性：5 V_{P-P}，负极性。

② Z 轴最高调制频率：5 MHz。

③ Z 轴最大输入电压：30 V（$DC + AC_{P-P}$）。

④ 探极校准信号：方波；1 V_{P-P}±5%；1 kHz±5%。

二、XJ4362 型示波器的工作原理

XJ4362A 型示波器原理框图如图 3-16 所示。

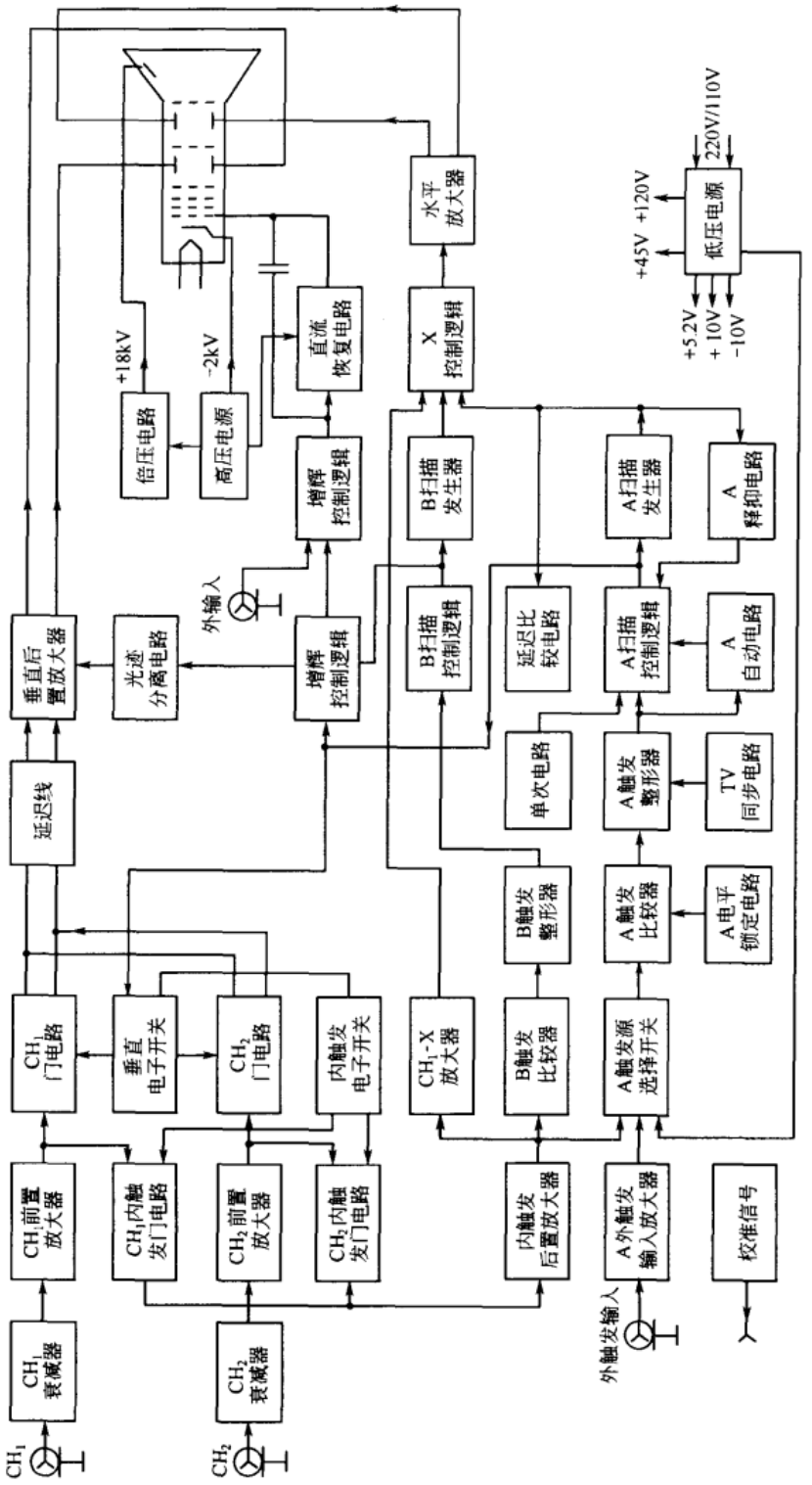


图 3-16　XJ4362A 型示波器原理框图

（一）Y 轴系统

Y 轴系统由衰减器、前置放大器、门电路、电子开关、后置放大器、内触发放大器及内触发选择开关等组成。被测信号可分别由两个 Y 输入插座（CH_1、CH_2）输入，经衰减后，送至前置放大器放大，借助电子开关及门电路的作用，可任意控制两个通道的信号或单独输出（即 CH_1 单独显示或 CH_2 单独显示），或轮流输出（即 CH_1CH_2 断续或交替显示），或同时输出，至延迟线经延迟后由后置放大器放大再加至 Y 偏转板。示波器的显示方式可由面板上的“垂直方式”开关选择决定。内触发选择开关根据电子开关的工作状态自动选择出其中一路被测信号送往 X 轴系统作内触发信号源。内触发放大器把某路被测信号由差分信号变成单端信号并放大，去驱动触发脉冲发生器。下面重点讨论两种显示方式原理。

1．交替：双踪示波器工作于此方式时，电子开关的转换频率受扫描电路控制，以一个扫描周期为间隔，电子开关轮流接通 CH_1 和 CH_2。如第一次扫描时，电子开关接通 CH_1 的信号 u_1，使它显示在荧光屏上，则第二次扫描接通 CH_2 的信号 u_2，再使它显示在荧光屏上。每隔一个扫描周期，交替轮换一次，如图 3-17 所示。随着扫描的重复轮流显示 u_1 与 u_2 的波形。因为扫描的频率较高（大于每秒 25 次），两个信号轮流显示的速度很快，加之荧光屏有余辉时间和人眼有视觉滞留效应的原因，从而获得两个波形似乎同时显示的效果。但当扫描频率较低，就可能看到交替显示波形的过程。因此这种显示方式只适用于被测信号频率较高的场合。当扫描速度工作在较慢情况下，采用“断续”方式，反之采用“交替”方式。

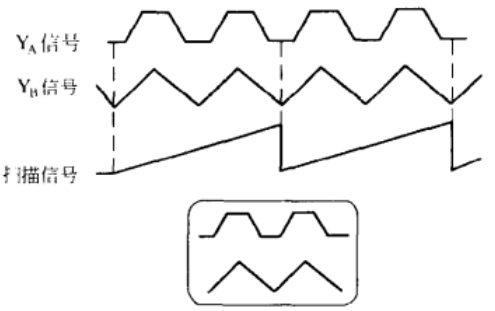


图 3-17　交替显示

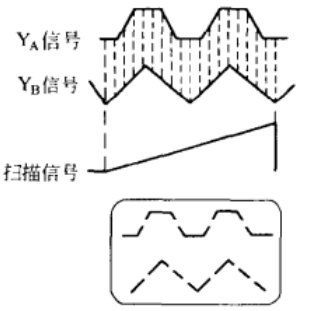


图 3-18　断续显示

2．断续：当示波器工作于此种显示方式时，电子开关工作在自激状态（不受扫描电路控制），将两个被测信号分成多个小段轮流显示，如图 3-18 所示。由于转换频率比被测信号频率高的多，间断的亮点靠得很近，人眼看到的波形好像是连续波形。如被测信号频率较高或脉冲信号的宽度较窄时，则信号的连续现象就较显著。因此，这种显示方式只适用于被测信号频率较低的场合。

Y 轴系统中设有光迹分离电路，供 A/B 交替扫描时用。

（二）X 轴系统

XJ4362 型示波器的 X 轴系统比较复杂，它有两个扫描系统：A 扫描和 B 扫描。A 扫描与通常单踪示波器相似，输入到 A 触发电路的内、外、市电等触发信号、电视信号经 A“触发源”选择开关选择进入 A 触发比较整形电路，再经 A 扫描控制逻辑电路，使 A 扫描发生器工作，产生线性良好的锯齿波。此扫描锯齿波经 X 控制逻辑选择，获得 A 扫描显示。A 扫描有自动、常态、单次三种扫描工作方式。

另外，示波器还允许工作于 X-Y 方式。此时，来自触发电路的 CH_1 信号送至 CH_1-X 放大器，再经 X 控制逻辑选择，加到水平放大器，而扫描发生器被关闭。

B 触发电路只能采用内触发信号，此触发信号经 B 触发比较整形电路，再经 B 扫描控制逻辑，使 B 扫描发生器工作，产生线性良好的锯齿波，经 X 控制逻辑选择，获得 B 扫描显示。B 扫描对于 A 扫描有一个延迟时间。它可以在延迟时间末端立即产生 B 扫描，也可在延迟时间过后受触发而产生 B 扫描，B 扫描的扫描速度高于 A 扫描。

在 A/B 交替扫描显示方式时，交替显示开关逻辑控制 A 扫描和 B 扫描锯齿波轮流通过水平放大器，获得交替扫描显示。此时，Y 轴系统的光迹分离电路在 A 光迹的基础上使 B 光迹作相对位移。

三、使用方法

（一）双踪显示

分别将二个被测信号输至 CH_1 和 CH_2，垂直方式开关置于 CH_1CH_2 位置。调节 CH_1、CH_2 位移电位器及 v/div 开关，在屏幕上显示出稳定的波形。

（二）相加（相减）

垂直方式开关置于 $CH_1 \pm CH_2$，当 CH_2 位移电位器拉出时（拉出极性为负），CH_2 通道加至后置放大器的极性相反，屏幕上显示 CH_1 与 CH_2 的信号差。为了相加或相减的测量准确，CH_1、CH_2 通道的偏转因数必须严格地保持一致。

（三）X-Y 方式和外 X 方式工作

将 t/div 开关逆时针方向旋足为“X-Y 或外 X”工作状态。触发源开关置于 CH_1，垂直方式开关置于 CH_2。示波器处于 X-Y 工作方式时，CH_1 输入端成为 X 输入端。当触发源开关置于“外”时，示波器处于外 X 工作方式。

（四）触发（同步）

1．触发源开关

在垂直工作方式开关置于 CH_1CH_2 和 $CH_1 \pm CH_2$ 工作方式时，触发信号完全由触发源开关选择决定。

电源：当被测信号与电源信号有一定的时间关系时，触发源开关可选择“电源”。

外：有时需要外信号触发，信号可馈送到外触发输入插座，触发源开关置于“外”。被测的信号必须和触发信号具有一定的时间关系，才能稳定显示被测波形。

2．耦合开关

AC：触发信号经过交流（AC）耦合馈送到触发电路，这是最常采用的耦合方式，频率低端为 10 Hz。

DC：触发信号经直流耦合馈送到触发电路。当要观察的信号频率很低，信号的占空比很大时应置于“DC”。

3．极性开关

“+”：当极性开关置于“+”位置时，触发信号在上升方向（正向）越过触发点产生扫描。

“-”：当极性开关置于“-”位置时，触发信号在下降方向（负向）越过触发点产生扫描。

4．触发方式

电平电位器向顺时针方向旋转，触发电平趋于正；向逆时针方向旋转，触发电平趋于负。当电平电位器置于锁定位置时，触发电平自动保持在触发信号幅度内（约在信号幅度的中点），因此无需调节触发电平，仍能触发扫描，稳定显示波形。

（五）单次工作方式

适用于非周期信号或单次信号的观测。将扫描方式开关置于“触发”位置，把信号加至输入端调节触发电平，扫描开关置于“单次”（三只按钮全部弹出），如有信号立即触发扫描一次，再要观察就按复位按钮。

（六）X 扩展

将扫描微调拉出，X 放大倍数扩展 10 倍，显示的波形在水平方向也扩大了 10 倍，其扩展中心在屏幕中心向两边扩展。可借助 X 移位电位器，将显示波形的任意一点移到屏幕中心。

（七）延迟扫描（加亮、B 扫描）

上述 X 扩展比较简单，但只能扩大 10 倍。如果用延迟扫描的方法可扩展上千倍。其扩展倍数是 A 扫描和 B 扫描时间因数的比值。

1．连续可变延迟

水平显示开关置于“A”，调节示波器各旋钮，屏幕上显示一合适的波形。调节 B 扫描时间因数开关较 A 扫描时间因数快几挡，水平显示开关再置于“加亮”。调节延迟时间电位器，可连续移动加亮段于要扩展的位置（从 A 扫描起点到 B 扫描的起点为延迟时间）。然后水平显示开关置于“B”，示波管屏幕上显示 B 扫描加亮段被扩展的信号，扩展的倍率为 A 扫描时间因数与 B 扫描时间因数的比值。

2．触发延迟

当波形扩展 100 倍以上时，采用连续可变延迟方式会引起水平方向的晃动，而采用触发延迟方式可减少甚至消除晃动。

水平显示开关置于“B 触发”。由于触发脉冲不是触发 A 扫描，A 扫描再触发（控制）B 扫描，而是直接触发 B 扫描，所以减少了晃动。

第五节　数字存储示波器

数字存储示波器具有存储功能，它用 A/D 变换器将模拟波形转换成数字信号，然后存储在半导体存储器 RAM 中，需要时再将 RAM 中存储的内容调出，通过相应的 D/A 变换器，再将数字信号恢复为模拟量，显示在示波管屏幕上。在该类示波器中，信号处理功能和信号显示功能是分开的。其性能和指标完全取决于进行信号处理的 A/D、D/A 变换器和半导体存储器。

数字存储示波器使用简单；可观测触发前的信号；用 X-Y 方式观测波形时，两通道间几乎没有相位差；观测信号时无闪烁现象；准确度高，可优于 1%；可很方便地与数字接口相连，与计算机组成自动测试系统。

一、数字存储示波器的基本组成和工作原理

数字存储示波器的基本原理框图如图 3-19 所示。它由控制部分、取样存储和读出显示三大部分组成。它们通过数据总线、地址总线和若干控制线互相联系和交换信息。

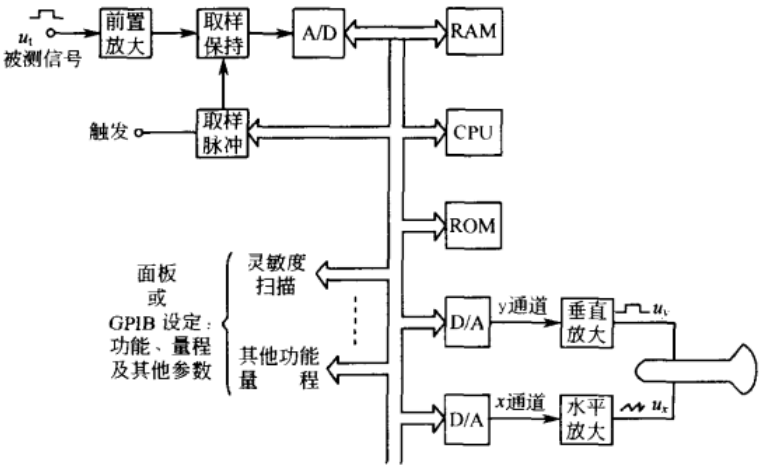


图 3-19　数字存储示波器原理框图

控制部分由 CPU 和只读存储器 ROM 等组成。CPU 控制所有接口、随机存储器 RAM 的读写、以及地址总线和数据总线的使用。在只读存储器 ROM 中，存有示波器操作功能的全部指令。工作时，微处理器 CPU 根据面板上各按钮的设置，调出并执行 ROM 中的对应指令。取样和存储部分主要由取样保持电路、A/D 变换器和随机存储器 RAM 组成。放大后的模拟输入信号取样经 A/D 变换器变换成二进制数字码，存入半导体随机存取存储器 RAM 中。在此过程中，通常采用取样保持电路，使模拟输入信号在足够的时间内保持稳定，以便变换器完成变换动作，并可降低 A/D 变换的孔径时间（在 A/D 变换器中，由模拟量变为数字量所用的时间称为孔径时间）。取样脉冲形成电路受触发信号控制，也受 CPU 控制。图 3-20 示出了取样和存储过程的示意图。以观测脉冲信号为例，由图 3-20（a）到图 3-20（c）完成了对被测波形的分解，即量化过程。

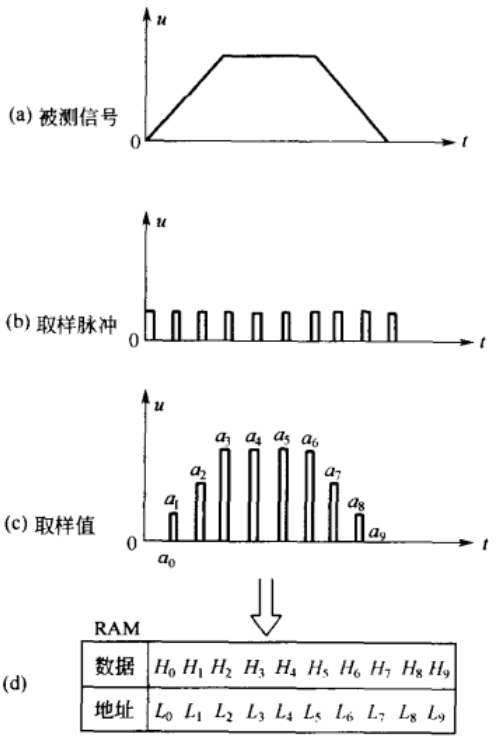


图 3-20　取样和存储过程示意图

将量化量 a_0、a_1、…、a_n 分别经 A/D 变换成相应的数字量 H_0、H_1、…、H_n，这就完成了被测波形的数字化过程。然后将数字量 H_0、H_1、…、H_n 依次存入首地址为 L_0 的存储器 RAM 中。首先取出数字量 H_0，写入首地址 L_0 中，这就完成了一个点的写入过程。而后取出 H_1、H_2、…、H_n 分别写入地址 L_1、L_2、…、L_n 中。取点的多少完全取决于存储器 RAM 的容量。例如把一个波形存放在 256 个地址里（称这些地址为一个页面），这就完成了存储过程。读出显示部分主要由 X 通道、Y 通道及 CRT 组成。X 通道和 Y 通道有各自的 D/A 变换器。当需要显示时，通过 CPU 将存储于 RAM 中的数字化信号调出，送到 X 和 Y

通道，进行D/A变换，并在Y通道得到模拟电压，在X通道得到扫描电压。图3-21示出了读出和显示过程的示意图。从这个页面的首地址 L_0 开始，依次从地址 L_0、L_1、…、L_n 中取出数据量 H_0、H_1、…、H_n，送到Y通道的D/A变换器，复原为模拟信号，加至示波管的垂直放大器，驱动CRT垂直偏转板。同时CPU将存储器的地址数据 L_0、L_1、…、L_n 送到X通道D/A变换器，产生一个线性上升的阶梯电压。图3-21中的（c），每个地址一个阶梯，加到X放大器，这就是扫描电压，驱动CRT水平偏转板，从而在CRT屏幕上显示细密光点，重现出模拟输入信号。当阶梯足够多时，所显示的波形与被测输入波形相同。

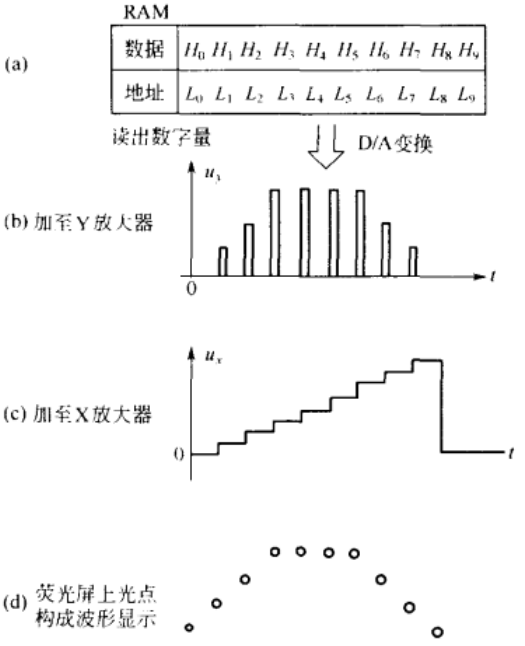


图3-21　读出和显示过程示意图

屏幕上所显示的每个点都代表数字存储示波器捕获的一个数据字，点的垂直屏幕位置，由存储器定位的数据给出，点的水平屏幕位置由存储器定位的地址给出。

存储示波器的取样存储和读出显示的速度都是可以任意选择的。例如，可以高速存入、低速读出，也可以相反。这样使用就十分灵活方便。比如，采用低速存入、高速读出，即使观测甚低频信号波形，也不会像通用示波器那样由于屏幕余辉时间不够而使波形产生闪烁。

在CPU的控制下，屏幕显示波形的同时，还能用数字显示各种设定值和测量结果。CPU可对波形数据进行各种运算处理，可编程对仪器进行自动控制，还可通过记录器作硬拷贝。通过GP-IB标准接口，将波形数据送到计算机等外部设备，进行更复杂的数据运算和分析处理。

A/D变换器（即编码器），它是将模拟量信号（电压或电流）变换成数字量信号的器件。A/D变换器是波形存储的核心部分，数字存储示波器的垂直分辨率、精确度、取样频率和存储带宽等主要性能指标由它来决定。

存储器在数字存储示波器中，一般采用半导体静态读写存储器（SRAM），也有采用磁盘和动态存储器（DRAM）的。半导体静态读写存储器便于写入读出，并且只要仪器不断电，或用电池给存储器供电，存储信息可以长期保存，且可随时读出。存储器的主要指标是存储容量和读写时间。一般选用存储容量大、读写时间快、耗电小的RAM。

二、数字存储示波器的特点

数字存储示波器发展极为迅速，各种功能层出不穷。这里仅就一些基本的功能特点加以说明。

（一）存储时间长

在数字存储示波器中是将被测模拟信号经数字化后存储于存储器中，只要存储器不急于存其他波形，已存波形就可以继续保存下去，只要存储器不断电，就可长期保存。同时，还可利用面板上的保护开关，使有关存储器只能读出，不能写入，因而能很好地保护存储的波形。数字存储示波器的这种长期存储波形的特性，经常用来进行波形比较。利用示波器中的

一个通道，存储标准或参考波形并加以保护，其他通道则可用来观测需要检查比较的信号。

（二）观测慢速信号，不产生晃动与闪烁现象

使用传统示波器观测慢速信号时光迹存在闪烁现象。在数字存储示波器中，只要对波形进行一次取样存储，就可以长期保存、多次显示。由于存储器的写入与读出是不相关的，取样、存储和读出、显示的速度可以在很大的范围内调节，因此在显示时，光迹无闪烁。这种示波器便于捕捉和显示单次瞬变信号或低速缓慢变化的信号，经常用于地震检测、金属断裂和材料变形试验中，使数字存储示波器在非电量测量中也得到广泛的应用。

（三）便于波形数据分析处理

由于数字存储示波器是以模拟输入信号数字化和数字存储为基础的，便于波形数据进行各种数字化处理分析。亦可通过 GP-IB 或 RS-232 接口将已存储数据送至计算机，组成自动测试系统，作进一步数据处理，使示波器功能得到扩展。

1．累计峰值检测功能

在触发点固定的情况下，将每次扫描在每个取样窗口得到的每组最大值和最小值与上一次扫描对应的取样窗口得到的最大值与最小值进行比较，保留最大值与最小值，再供下一次比较。累计峰值检测功能是通过软件来实现的。

2．平均功能

有的数字存储示波器用软件实现平均功能，可将埋在噪声中的微弱信号检测出来。平均次数可设定为 2^n，$n=1\sim8$。与累计峰值检测一样，平均时扫描次数可设定或不设定。

采用平均处理功能可提高分辨率和测量准确度。

3．CRT 读出功能

在示波管屏幕上除了显示波形外，还同时显示有关参数。如通道 1 垂直偏转因数、输入耦合方式，通道 2 垂直偏转因数、输入耦合方式，A 扫描时间因数、B 扫描时间因数、A 和 B 扫描间的延迟时间、获取方式和触发点位置等。

4．游标测量功能

数字存储示波器采用游标来进行电压和时间的测量，可以减小人为的读数误差，提高测量准确度。

示波管屏幕上显示的有获取存储器中的波形，也有参考存储器中的波形，游标具有跟踪功能，能移至任意一个波形的任意位置。可在示波管屏幕上直读两游标间的电压和时间差。有些示波器还可直读频率。

5．存储波形的扩大及缩小

采用软件，可将已存储波形在垂直方向扩展 2～10 倍，或缩小 2～10 倍；水平方向扩展 10 倍，供进一步分析处理。

（四）触发点位置可任意设定

数字存储示波器具有预触发、后触发、窗口触发和数字组合触发等多种触发功能，可将触发点位置设置在波形任意的位置上，从而能灵活地观测触发点之前的信号，这是数字存储示波器的一个重要特点。因为普通示波器只能观测触发后的信号，而数字存储示波器可利用它的预触发功能，观测触发点以前的信号。这种触发特性，特别有利于分析故障产生的原因，观测单次信号时尤为方便。

（五）多种显示方式

数字存储示波器具有存储显示、卷动显示和自动抹迹等多种灵活的显示方式，以适应观

测不同信号的要求。

1．存储显示

它可稳定、不闪烁的显示所存储的瞬变信号，同时显示的波形可根据观测的需要进行扩展和移动，便于对瞬变信号进行仔细分析和研究。

2．自动抹迹

自动抹迹也叫自动清除。在这种显示方式时，每满足一次触发条件（例如加一次触发脉冲），屏幕上原来显示的波形就被新的波形所代替。新波形的显示时间是可以调节的，当显示时间超过预置的时间以后，如再满足触发条件，则又自动抹掉旧画面，显示这次触发存储的新波形。

3．卷动显示

这是数字存储示波器特有的工作方式，主要用于连续观测低速变化信号，并可检测数据流中随机出现的偶发信号。只要画面上出现观察者所需的信号，便可按保护键，把所需内容长期保存下来。

从上可见，数字存储示波器比模拟示波器具有更优越的性能。因此，数字存储示波器已广泛应用于电气、机械、材料试验分析、生物医学、电子、国防科研、生产过程以及其他如地震、激光和纺织等领域。

第六节　示波器的应用

原则上说，一切时间函数，以及自变量与时间成正比的函数图形，都可以用电子示波器显示出来。当信息载于波形上时，则反映信息的特征量可以用示波器进行测量。

一、示波器的选择与正确使用

（一）示波器的选择

选择示波器时应使它的性能指标满足对信号观测的要求。垂直通道的带宽是选择示波器的一个基本标准，它在很大程度上决定了示波器可以观测的最高信号频率（对周期性的连续波形）或脉冲的最小宽度。产品说明书中，有的给出频带宽度，有的给出高端频率，由于示波器的低端频率远小于高端频率（有的低端从直流开始），因而，可以认为两者近似相等。要求不失真的重现被测信号波形，其基本条件之一是垂直通道频带要足够宽，一般情况下，示波器的带宽应为被测信号最高频率分量的3倍。对于测量脉冲情况，其上升时间与示波器带宽之间的关系为

$$\text{带宽} = 0.35/\text{上升时间}$$

此外，观测不同的信号对示波器有不同要求。例如对于微弱信号要选择Y通道灵敏度高的示波器。当观测窄脉冲或高频信号时，除了示波器的通带要宽外，还要求有较高的扫描速度。观测缓慢变化的信号要求示波器能低速扫描和具有长余辉，或者又有记忆存储功能。观测两个独立信号可选双踪示波器，观测多路相关信号可选用多踪示波器。当需要在观测信号的同时还要仔细观察它的部分细节内容时，可选双扫描示波器。当需要把被观测信号保留一定时间，应选用记忆存储示波器。

（二）探极的选用

合理使用探极可减小示波器输入阻抗对被测电路的影响，常见的探极有：低电容探极、

源极跟随器探极、电阻分压器探极。使用示波器探极时应注意下面几点。

（1）必须根据测试的具体要求来选用探极类型，否则将得到相反的效果。比如误用电阻分压器探极去测量高频或脉冲电路，那么由于这种探极的频率响应很差，将使脉冲波形产生严重的失真。

（2）探极和示波器一般都应配套使用，不能互换，否则将会导致分压比误差增加或高频补偿不当。特别是低电容探极，如果示波器垂直通道的输入级放大管更换而引起输入阻抗改变，或探极互换，这都有可能造成高频补偿不当而产生波形失真。

（3）低电容探极的电容器应定期校正。具体方法是：以良好的方波电压通过探极加到示波器，若高频补偿良好，应显示图 3-22（a）波形。若补偿不足或过补偿，则分别会出现图 3-22（b）和（c）波形，这时可微调探极的电容，直至调到出现良好的方波。在没有方波发生器时，可利用示波器本身的幅值校准电压。

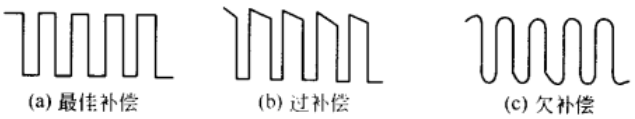


图 3-22　不同补偿时的波形图

（三）示波器与被测电路的连接

低频或几百千赫连续波可以用一般导线连接，信号幅度较小时应当用屏蔽线以免外界干扰，脉冲和高频信号必须用高频同轴电缆连接。

当信号过强而必须采用外接分压器时，分压器输入阻抗要高，输出阻抗要低，使接上示波器后不影响分压比。分压比应在宽的频率范围内保持不变，以免波形失真。

二、电压的测量

利用示波器测量电压有它独特的特点，那就是它可以测量各种波形的电压幅度，包括测量脉冲和测量各种非正弦波电压的幅度。更有实际意义的是，它可以测量一个脉冲电压波形的各部分的电压幅值，例如上冲量、顶部下降量等。

利用示波器测量电压的基本方法通常采用直接测量法（标尺法）。所谓直接测量法，就是直接从示波器屏幕上量出被测电压波形的高度，然后换算成电压值。若已知 Y 通道的偏转灵敏度，则可求得被测电压值

$$U_{P-P} = D_y \times h \tag{3-4}$$

式中　U_{P-P}——被测电压峰-峰值或任意两点间电压值，V；

D_y——偏转灵敏度，V/cm；

h——被测电压波形峰-峰高度或任意两点间高度，cm。

这种测量方法简单。它的误差有探极误差，Y 通道偏转灵敏度误差（衰减器、放大器、示波管偏转系统误差）和引入测量误差（视差、光点直径引入误差等）。为了减小偏转灵敏度误差，可用示波器的标准信号校准。校准后偏转灵敏度误差主要有校准信号误差。

三、时间测量

时间测量多指对脉冲波形的宽度、周期、上升时间、下降时间等时间参数的测量。众所周知，时间、频率和相位是三个密切相关的参量，可通过测量时间，求得频率和相位。例

如，通过测量连续波（正弦波、三角波、方波等）的周期求其频率。又如，用双通道示波器测量两正弦波对应点之间的时间间隔，可计算这两个信号之间的相位差。因此时间测量是示波测量技术的一项重要内容。

（一）常用的时间测量法

1．标尺法（定扫速法）

观测信号时，示波器的时基因数 F_1 已知，若屏幕上某两点的水平距离为 l，则这两点间所对应的时间为

$$t = F_1 \times l \tag{3-5}$$

如果使用“扫描扩展”，扩展倍数为 K（一般为 5 或 10）则

$$t = F_1 l / K \tag{3-6}$$

标尺法测量时间的误差包括时基因数误差、l 的测量误差、扩展倍数误差和扫描非线性误差。总测量误差一般为（5～10）%，为了减小时基因数误差，可用标准频率校准时基因数。

2．延时法

用延时法测量时间，误差较小，在双扫示波器中获得广泛应用。

把被测信号送入双扫示波器的 Y 输入端，若被测时间比较长，则让示波器工作在“B 加亮 A”方式。选择适当的 A 扫描速度，调节“水平移位”，使被测时间处在中间 8 格的范围内，以减小 X 放大器的非线性失真影响（延时法能消除扫描发生器非线性引入的误差，但不能消除 X 放大器非线性引入的误差）。选择很小的 B 时基因数，使屏幕上显示的被测信号波形上出现一个加亮点。调节“延时”，使加亮点位于被测时间的起点，记下此时“延时”旋钮的刻度 t_{D1}；再次调节“延时”，使加亮点位于被测时间的终点，记下此时“延时”旋钮的刻度 t_{D2}，则被测时间为

$$t = F_A \times (t_{D1} - t_{D2}) \tag{3-7}$$

式中 F_A——A 扫描时基因数。

被测时间较短时，很难在显示波形上得到一个加亮点，只能得到一个加亮段。这时，可让示波器工作在 B 扫描状态，选择适当的 B 扫描速度，以便把被测时间显示适当长度；同时应选择与 B 扫描速度相近的 A 扫描速度，以便准确的读出延迟时间。调节“水平移位”和“延时”旋钮，使被测时间起点正好位于标尺中心垂直刻度线上，记下此时“延时”旋钮的刻度 t_{D1}，然后只调节“延时”旋钮，使被测时间终点位于标尺的中心垂直刻度线上，记下此时的“延时”旋钮刻度 t_{D2}，则被测时间仍由式（3-7）求得。

（二）频率测量

用示波器测量频率最简便的方法是测量信号周期，计算频率值。此外，还可用李沙育图形法、调亮圆扫法、拍频法等。这里仅说明用李沙育图形法测量频率。

在示波管 X、Y 两对偏转板上都输入正弦信号，那么屏幕上就将出现李沙育图形。图 3-23（a）画出了同频、同幅的两个正弦信号，二者相位差不同时的李沙育图形。（b）和（c）画出了频率比为 1:2 和 1:3，幅度不等的几种相位差时的李沙育图形。由图 3-23 可见，频率比不同时。李沙育图形不同；相位差不同时，李沙育图形也不同；当频率比和相位差一定时，幅度变化只会使李沙育图形的外切矩形的长或宽变化，而图形的基本形状不变。因此可以根据李沙育图形来求得频率比。若其中一个为标准频率，则可求得另一个被测频率。

设加在 X、Y 偏转板上的电压 u_x、u_y 的频率分别为 f_x 和 f_y，它们的频率比为

$$\frac{f_x}{f_y}=\frac{m}{n} \tag{3-8}$$

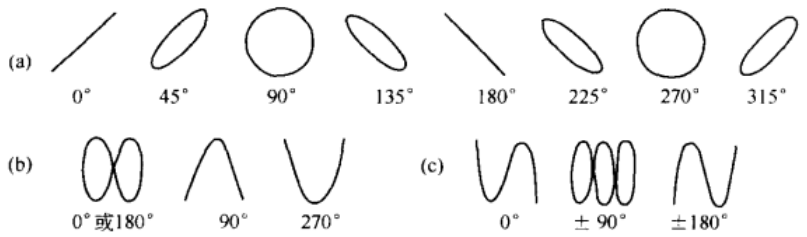


图 3-23　李沙育图形

当 u_x 经历 m 个周期时，u_y 正好经历 n 个周期。众所周知，正弦波在一个周期内，正负峰值各出现一次，因此在 u_x 的 m 个周期内，u_x 的正负峰值各出现 m 次。也就是说李沙育图形上，x 值的正负极值各有 m 个，y 值的正负极值点各有 n 个。所以，可以由李沙育图形的 x、y 值的极值点数来计算 f_x 与 f_y 的比值。若 f_x 为标准频率，则被测频率为

$$f_y=\frac{n}{m}\times f_x \tag{3-9}$$

式中　m——李沙育图形 x 值的极值点数；

n——李沙育图形 y 值的极值点数。

由图 3-23 可见，当 f_x 与 f_y 比值一定时，由于相位差不同，李沙育图形可能是闭合曲线，也可能是非闭合曲线。前者的极点容易观察，后者就不大方便。对于正弦波电压来说，其正峰值和负峰值之间的任一电压值在一个周期内一定出现两次。因此在 u_x 的 m 个周期内，正负峰值之间的某一 u_x 值一定出现 $2m$ 次，某一 u_y 值一定出现 $2n$ 次，对于非闭合的李沙育图形，同一电压值所出现的两次重合于一点，故只能看到 m 次 u_x 值和 n 次 u_y 值。所以，可以由李沙育图形与垂直直线的交点数以及它与水平直线的交点数来计算 f_x 与 f_y 的比值。若 f_x 为标准频率，则被测频率按下式计算

$$f_y=\frac{n'}{m'}\times f_x \tag{3-10}$$

式中　m'——李沙育图形与垂直直线的交点数；

n'——李沙育图形与水平直线的交点数。

当 $f_x=f_y$ 时，李沙育图形是一条直线，一个圆或一个固定的椭圆。当 f_x 与 f_y 相接近，不完全相等时，李沙育图形按直线——椭圆——圆——椭圆——直线的顺序缓慢变化。循环一周所用的时间为

$$\Delta t=\frac{1}{f_y-f_x} \tag{3-11}$$

因此，记下时间 Δt，则可测量两个频率之间的微小差异。可以用这种方法测量频率的长期稳定度。

由式（3-10）可知，李沙育图形法测量频率不适合 m'，n'很大的情况，因为这时图形中的线条数目过多，难于计数。由式（3-11）可知，李沙育图形测频法不适用于频率稳定度很低的情况，因为这时图形变动太快，难于观测。

（三）相位差的测量

用示波器测量相位差的常用方法有线性扫描法和李沙育图形法。

1．线性扫描法

把两个被测的信号分别加在双踪示波器 Y 通道的两个输入端，两个信号同时显示在屏幕上。为了观测两者之间的相位关系，需要把其中一个信号作为触发信号。由于两个信号的波形是在同一个线性扫描电压作用下，因此可以根据波形测得它们之间的相位关系。两个被测信号的幅度可能不同，为了便于观测、计算，可通过改变通道的增益，使屏幕上显示的两个信号幅度相等，且把两个信号的瞬时零值都调节在屏幕中间的水平刻度线上，如图 3-24 所示。图中线段 ac 对应于被测信号的一个周期，线段 ab 是相位差 φ_d 所对应的时间。这时相位差为

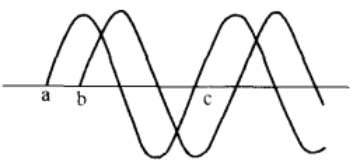


图 3-24　线性扫描法测量相位

$$\varphi_d = (\overline{ab}/\overline{ac}) \times 360° \tag{3-12}$$

线性扫描法测量相位差，方法简单，但精度较低，误差主要来源是两个通道相移不一致，图形分辨力和视差等。为了减小两通道不一致产生的系统误差，可先把一个信号送入两个通道，测量出系统误差，然后对测量结果进行修正；也可用置换法减小这个系统误差。

2．李沙育图形法

图 3-25（a）画出了同频、等幅、不同相位时的李沙育图形。在图 3-25（a）中，设

$$u_x = U_{mx}\sin\omega t$$

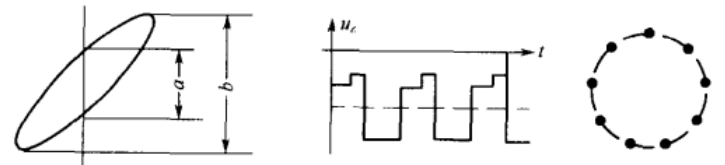
$$u_y = U_{my}\sin(\omega t + \varphi)$$

$$\varphi = \arcsin\frac{a}{b} \tag{3-13}$$

式中　a——李沙育图形与通过图形中心的 Y 轴的两个交点间的距离；

b——李沙育图形的最大高度。

上式对于 $U_{mx} = U_{my}$ 或 $U_{mx} \neq U_{my}$ 都是正确的。



(a) 同频等幅不同相位的李沙育图形　(b) 脉冲电压波　(c) 顺时针方向扫描

图 3-25　李沙育图形法测量相位

φ 所在象限可这样确定：椭圆长轴在 1、3 象限内，则 φ 在 ±（0～90°）范围内，椭圆长轴在 2、4 象限内，则 φ 在 ±（90°～180°）范围内，若电子射线是顺时针扫描，则 φ 在 0～180° 范围内，若电子射线是反时针扫描，则 φ 在 180°～360° 范围内。为了确定电子射线的扫描方向，可在示波器 Z 轴加一个如图 3-25（b）所示的脉冲电压，此时，屏幕上将是断续的椭圆图，光点拖着尾巴。根据拖尾方向可判断电子射线方向。图 3-25（c）所示图形的电子射线沿顺时针方向扫描。

第七节　晶体管特性图示仪

示波器若配上测试晶体管特性参数的部件和电路，可扩展其功能，成为测绘晶体管特性

曲线的专用图示仪器，称为晶体管特性图示仪。

由于晶体管的一致性差，实际的晶体管特性和手册中给出的特性相差甚远，使用前必须进行测试。因此，晶体管特性图示仪成为制造和使用晶体管的实验室和工厂中最基本的设备之一。

晶体管特性图示仪，不仅能测试晶体管的特性，还能显示和测量各种半导体管、集成电路等多种器件的特性和参数。它具有显示直观、读数简便和使用灵活等特点。

一、晶体管特性图示仪的基本工作原理

为了说明晶体管特性图示仪的基本原理和组成，现以测定 NPN 晶体管共发射极的输出特性为例，先了解一下用点测法测量晶体管特性曲线的基本步骤，其测试电路如图 3-26 所示。

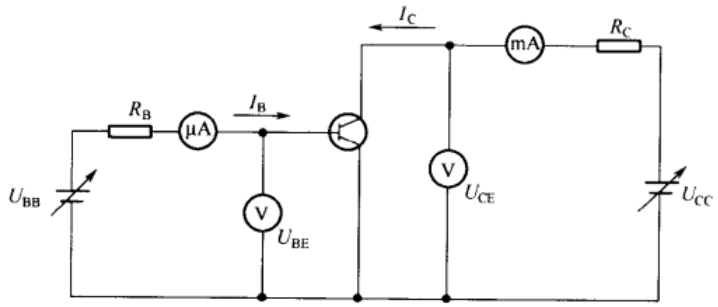


图 3-26　晶体管输出特性测试电路

晶体管的输出特性是指当基极电流 I_B 为某一定值时，集电极和发射极之间的电压 U_{CE} 与集电极电流 I_C 之间的关系，即 $I_C=f(U_{CE})|_{I_B=C}$，其测试的步骤如下。

先固定一个 I_B 然后改变电源电压从 0 到 U_{CC}，分别测得在不同的 U_{CE} 下所对应的 I_C 值。再将 I_B 固定到另一个值，重复上述步骤，再次测得在不同 U_{CE} 下所对应的 I_C 值。余此类推，便可得出不同 I_B 时的一组共发射极晶体管的输出特性曲线。

从上述测试步骤可以看出，如果要将这组曲线自动显示在示波管的荧光屏上，至少应解决以下三个问题。

① 对应于每一个测试步骤需要提供不同的基极注入电流 I_B，也就需要有一个如图 3-27 (b) 所示的基极阶梯电流。

② 对于每一个固定 I_B 值，需要改变一次集电极的电源电压 U_{CC}，一般用图 3-27 (a) 所示的正弦半波电压来实现。由于这种正弦半波电压可直接从市电经全波整流取得，所以目前大部分图示仪都是利用这种方法，并把此电压称为集电极扫描电压。

③ 要能把 I_C 和 U_{CE} 的数据及时取出，送到示波管的荧光屏上去显示出特性曲线。解决的方法是直接从晶体管的集电极和发射极之间取出 U_{CE} 经过放大后送到示波管的水平偏转板上，因为示波管垂直偏转板需要的也是电压，所以在 I_C 回路中接入一个小电阻 R_S（称为取样电阻），利用 $I_C\times R_S=U_S$，就可取得正比于 I_C 的电压 U_S，它直接反映了 I_C 的变化。只要 R_S 取得较小，就不会影响测试结果。然后把 U_S 通过放大器加到示波管的 Y 偏转板上，便可在示波管的荧光屏上显示出晶体管的输出特性曲线。

根据上述原理，可以得出图示仪的基本原理图，如图 3-28 所示。

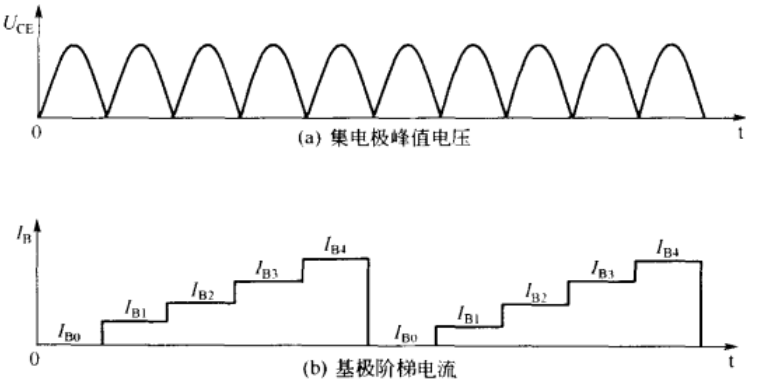


图 3-27　集电极峰值电压和基极阶梯电流

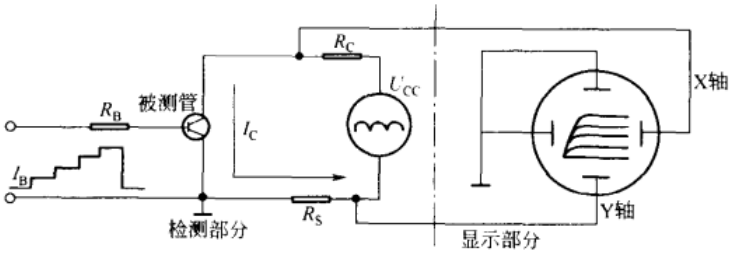


图 3-28　图示仪的基本原理图（1）

以上讨论了晶体管共发射极的输出特性。如果要测量和显示输入特性曲线（$I_B \sim U_{BE}$），如图 3-29 所示。从图 3-29 中的（3）和（4）点处取出 U_{BE}和 I_B，I_B 的取出如同取出 I_C 一样，也是经取样电阻 R_S 取出。把 U_{BE}通过放大器接到示波管的 X 偏转板上，把 I_B 经 R_S 的压降经过放大器接到示波管 Y 偏转板上，这样就可以在示波管的荧光屏上显示出不同接法的输入、输出特性曲线以及有关的主要参数。如从图 3-29 中的（4）、（3）点处取出的电压送到示波管可测得晶体管的输入特性曲线，从（1）、（2）点处取出的电压送到示波管可测得晶体管的输出特性曲线。

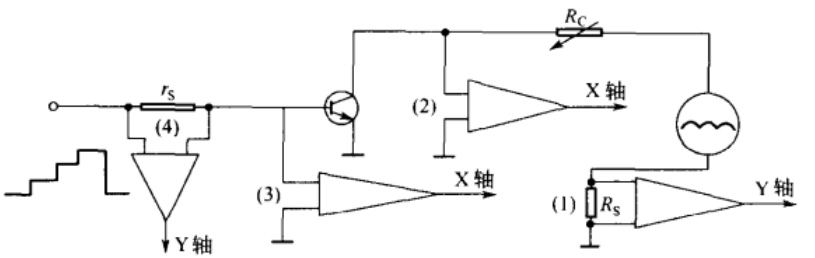


图 3-29　图示仪基本原理图（2）

二、图示仪的基本组成

由上述原理可以看出，晶体管特性图示仪应包括下面几部分，其基本方框图如图 3-30 所示。

① 基极阶梯信号发生器：提供必要的基极注入电流。

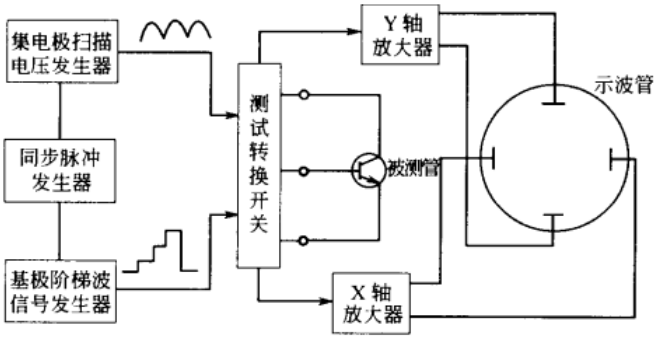


图 3-30　图示仪的基本方框图

② 集电极扫描电压发生器：提供从零开始可变的集电极电源电压。

③ 同步脉冲发生器：用来使基极阶梯信号和集电极扫描电压保持同步，使其正确稳定地显示图形（特性曲线）。

④ 测试转换开关：当测试不同接法和不同类型的晶体管特性曲线和参数时，用此开关进行转换。

⑤ 放大和显示电路：用以显示被测晶体管的特性曲线，其作用原理和电路形式与普通示波器基本相同，所以也可用普通示波器代替。

⑥ 电源：为各部分电路提供电源电压。

常用的晶体管特性图示仪（如 JT1 和 QTl），其原理和用法基本相同，下面介绍 QT1 的测试原理和使用方法。

三、QT1 晶体管特性图示仪的测试原理和使用方法

QT1 型晶体管特性图示仪是一种全晶体管化专用仪器，能在荧光屏上直接观察 PNP、NPN 型晶体管的各种特性曲线，还可通过荧光屏前的标尺刻度直接读测晶体管的各项参数。

（一）QT1 晶体管图示仪的功能

1．可测下列各击穿电压及饱和电流

BU_{EBO}、BU_{CBO}、BU_{CEO}、BU_{CES}、BU_{CER}；

I_{EBO}、I_{CBO}、I_{CEO}、I_{CES}、I_{CER}。

2．可测下列共射极或共基极特性曲线

① 输出特性：$I_C \sim U_{CE}$或 $I_C \sim U_{CB}$；

② 输入特性：$I_B \sim U_{BE}$或 $I_E \sim U_{BE}$；

③ 电流放大特性：$I_C \sim I_B$ 或 $I_C \sim I_E$。

3．可测二极管特性

① 正向或反向特性。

② 稳压和齐纳特性。

（二）QT1 整机方框图

QT1 型晶体管特性图示仪框图如图 3-31，其主要由集电极扫描发生器、基极阶梯波发生器、X 轴和 Y 轴放大器、测试转换开关、电源及显示电路等部分组成。

当选择被测晶体管连接成共发射极（共 E 极）或共基极（共 B 极）后，通过测试转换

开关，从集电极电压、集电极电流、基极（或发射极）电压和基极（或发射极）电流四者中任选两者，分别送到X轴放大器和Y轴放大器，使相应特性曲线显示在示波管的屏幕上。

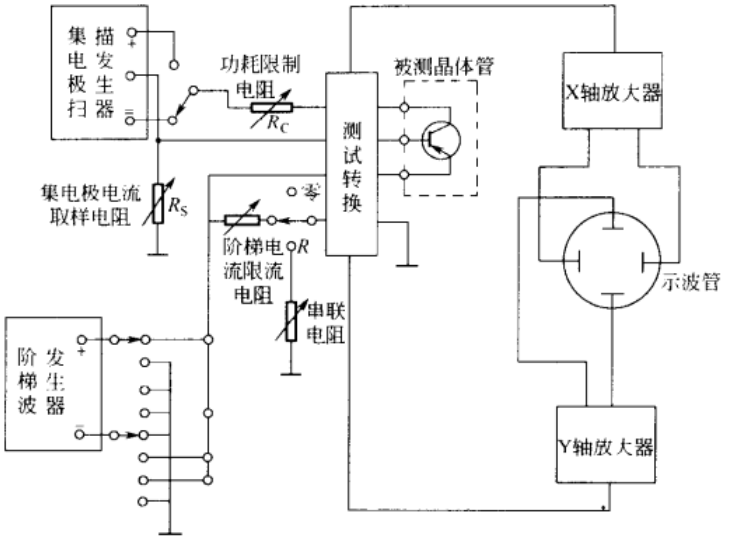


图 3-31　QT1 整机方框图

（三）QT1 的使用

1．晶体管特性和主要参数的测试

现以 3DG6 三极管为例，说明用 QT1 测量晶体管特性和主要参数的方法。

（1）输出特性的测试

① 共发射极的输出特性 $I_C = f(U_{CE})|_{I_B = C}$

测试原理简图如图 3-32 所示。开关和旋钮位置如下。

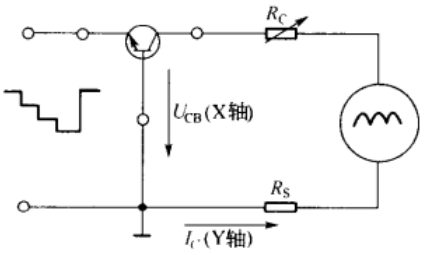


图 3-32　共射极输出特性测试简图

测试选择：$I_C \sim U_{CE}$。

极性转换：NPN 共 E。

扫描量程：0～20 V。

集电极电压：2 V/度。

集电极电流：2 mA/度。

阶梯电流：20 μA/级。

功耗电阻：1 kΩ。

X 倍率、Y 倍率均为 1×1，顺时针方向旋转“扫描电压调节”旋钮至一定位置时，屏幕上将显示出输出特性。

根据共射极直流电流放大系数 $\bar{\beta}$ 和共射极交流电流放大系数 β 的定义，在输出特性上可求出 $\bar{\beta}$ 和 β。

② 共基极的输出特性 $I_C = f(U_{CB})|_{I_E = C}$

开关和旋钮的位置如下。

极性转换：NPN 共 B。　　扫描量程：0～20 V。

集电极电压：2 V/度。　　集电极电流：2 mA/度。

阶梯电流：1 mA/级。　　测试选择：$I_C \sim U_{CE}$。

功耗电阻：100 Ω。

调节“扫描电压调节”旋钮，在荧光屏上将显示出特性曲线，根据共基极直流电流放大系数 $\bar{\alpha}$ 和共基极交流电流放大系数 α 的定义，在输出特性上可求出 $\bar{\alpha}$ 和 α。

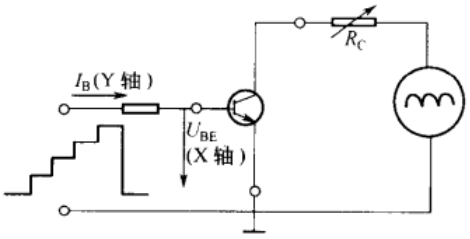


图 3-33　共发射极输入特性测试简图

(2) 输入特性的测试

① 共发射极的输入特性 $I_B = f(U_{BE})|_{U_{CE}=C}$

测试原理简图如图 3-33 所示。

开关和旋钮的位置如下。

测试选择：$I_B \sim U_{BE}$。　　极性转换：NPN 共 E。

X 倍率：×0.2 挡。　　Y 倍率：×5 挡。

阶梯电流：10 μA/级。

其余均与上述相同。然后再沿顺时针方向旋转“扫描电压调节”，屏幕上出现曲线，如图 3-34 所示。

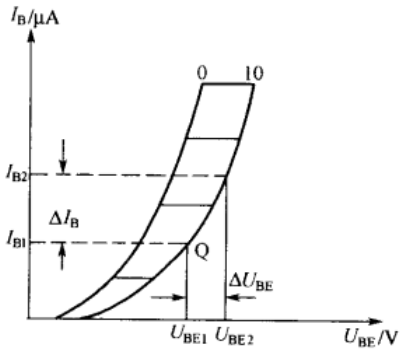


图 3-34　共发射极输入特性

由图 3-34 可以求出晶体管的输入电阻 $r_{BE} = \Delta U_{BE}/\Delta I_B$。

② 共基极的输入特性 $I_E = f(U_{BE})|_{U_{CB}=C}$

开关和旋钮位置如下。

测试选择：$I_B \sim U_{BE}$（实为 $I_E \sim U_{BE}$）。

极性转换：NPN 共 B。

阶梯电流：200 μA/级

其余均同共发射极输入特性的情况。

(3) 电流放大特性　共发射极电流放大特性

$$I_C = f(I_B)|_{U_{CE}=C}$$

测试原理简图如图 3-35 所示。

测试时旋钮和开关位置如下。

测试选择：$I_C \sim I_B$。　　X 倍率和 Y 倍率：分别为×5、×1。

极性转换：NPN 共 E。　　阶梯电流：2 μA/级。

集电极电流：2 mA/度。

其他与上述相同。曲线如图 3-36 所示，由此可以确定电流放大系数 $\bar{\beta}$ 和 β。

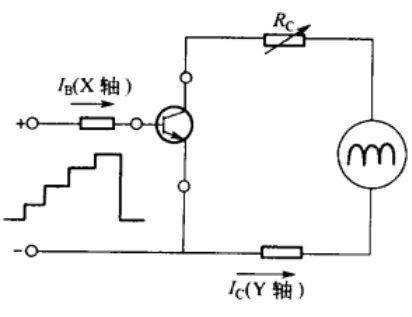


图 3-35　共发射极电流放大特性测试简图

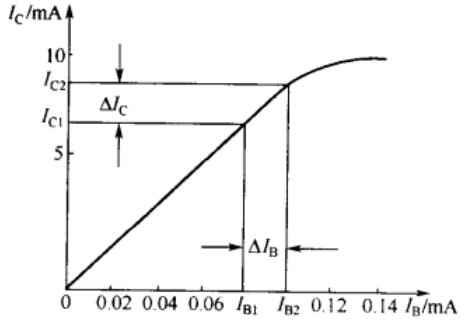


图 3-36　共发射极 I_C 和 I_B 的关系

$$\overline{\beta}=\frac{I_C}{I_B}$$

$$\beta=\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

用类似的方法可以测出共基极电流放大特性，并由相应的图求出共基极的电流放大系数。

(4) I_{CBO}和 BU_{CBO}的测试　I_{CBO}是集电极-基极反向饱和电流，表示发射极开路，C、B间加上一定反向电压时的反向电流。

BU_{CBO}是指发射极开路时，集电极-基极间的反向击穿电压。

I_{CBO}和 BU_{CBO}的测试电路如图 3-37 所示。测试时开关和旋钮的位置如下。

测试选择：BU_{CBO}。　　极性转换：NPN 共 E。

集电极电流：0.1 mA/度。　　集电极电压：5 V/度。

扫描量程：0～200 V。　　X 倍率和 Y 倍率均为×1。

插入晶体管前，一定要把“扫描电压调节”反时针旋到最小，否则会损坏晶体管。然后插入管子进行测试，缓慢顺时针旋转“扫描电压调节”，使荧光屏上出现波形，注意观察 BU_{CBO}，其图形如图 3-38 所示。

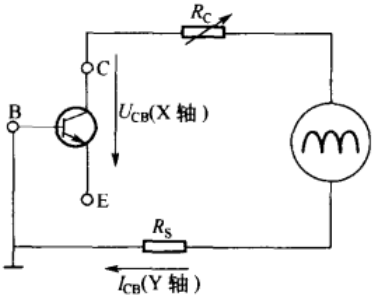


图 3-37　BU_{CBO}和 I_{CBO}的测试简图

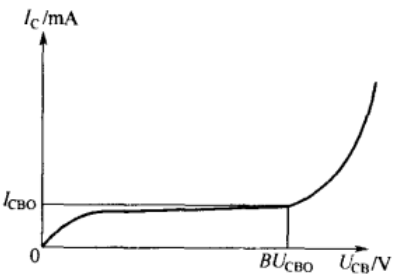


图 3-38　发射极开路时 I_C-U_{CB}关系曲线

(5) I_{CEO}和 BU_{CEO}的测试　I_{CEO}是集电极和发射极之间反向饱和电流，表示基极开路C、E间加上一定反向电压时的集电极电流。由于该电流是从集电区穿过基区到发射区，所以又称穿透电流。

BU_{CEO}是指基极开路时，集电极-发射极之间的反向击穿电压。

测试时旋钮和开关的位置除了测试选择应为 BU_{CEO}外，其余均与测 BU_{CBO}相同。

(6) 晶体管常见的几种不良特性　由于晶体管特性图示仪可观测管子特性的全貌，因此它不仅可以测量参数，而且可从所示特性曲线全面判断晶体管性能的好坏，下面举一些常见的不良特性，供测试和使用时参考。

① 特性曲线倾斜。如图 3-39 所示，曲线发生整个曲线族倾斜，而且 I_C 随 U_{CE}的增大而增大，这说明晶体管反向漏电流大，不能使用。

② 特性曲线分散。如图 3-40 所示，零注入线（$I_{B1}=0$）平坦，而其他曲线倾斜，这说明晶体管的输出电阻小，并且由于放大系数 β 的不均匀，引起信号的失真。

③ 小电流注入时特性曲线密集。如图 3-41 所示，I_C 较小时，曲线密集，这说明 β 小，晶体管在小电流工作时，放大作用小，容易引起信号的非线性失真。使用时应选择适当的静

态工作点和输入信号幅度。

与上述情况正好相反，有时也出现大信号注入时特性曲线密集。使用时同样要注意静态工作点和输入信号幅度的选择。

④ 曲线上升缓慢。如图 3-42 所示，特性曲线的上升部分不陡，说明饱和压降大，不适合作为开关管用；如作放大管时，也存在工作范围小，噪声大等问题。

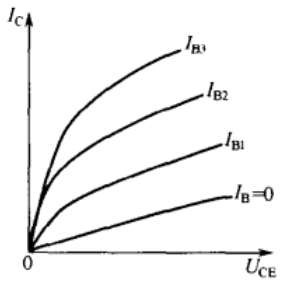


图 3-39　特性曲线倾斜

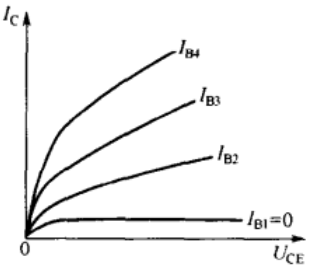


图 3-40　特性曲线分散

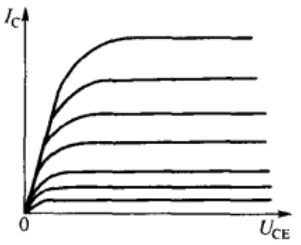


图 3-41　小电流注入时特性曲线密集

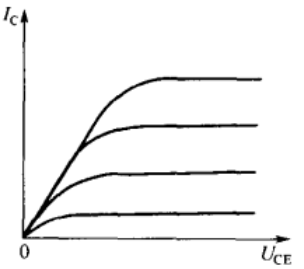


图 3-42　曲线上升缓慢

由上面列举的现象可知，由于晶体管的质量不好，可以从特性上反映出来。因此，在测试晶体管的特性时，应从所测得管子的质量判断是否符合电路要求。

2．二极管和稳压管特性的测试

各种二极管如整流二极管、开关管、高压二极管和稳压管等均可在 QT1 图示仪上测试其特性。

(1) 正向特性的测试　测试原理简图如图 3-43 实线部分所示。测试时开关和旋钮的位置如下。

测试选择：二极管特性。　　极性转换：PNP 共 E。

集电极电压：0.1 V/度。　　扫描量程；0～20 V。

X 倍率、Y 倍率均置于×1 挡。

将二极管的正极插入“E”，负极插入“C”。顺时针方向调节“扫描电压调节”旋钮至一定位置，在荧光屏上就会显示出正向特性曲线，如图 3-44 实线所示。

(2) 反向特性的测试　测试原理简图如图 3-43 中把二极管接成如虚线所示。测试时开关和旋钮的位置如下。

测试选择：二极管特性。　　极性转换：PNP 共 E。

集电极电流：0.1 mA/度。　　集电极电压：2 V/度。

扫描量程：0～20 V。　　X 倍率、Y 倍率均置于×1 挡。

二极管的正端插入“C”，负端插入“E”。顺时针方向调节“扫描电压调节”旋钮到一

定位置，在荧光屏上显示出反向特性曲线，如图 3-44 所示虚线部分。用上述同样的方法可以测试稳压管等其他二极管的特性。

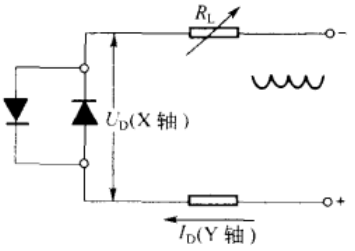


图 3-43　二极管特性测试简图

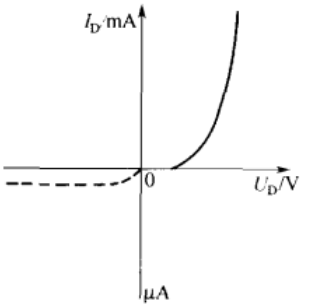


图 3-44　二极管的伏安特性

（3）说明

① 测试二极管正向特性时，应特别注意扫描电压的极性。极性选择开关置于 PNP 时插座上的 C 为负，NPN 时插座上的 C 为正。

② 测反向特性时，“集电极电压（V/度）”应置于较大挡级，“集电极电流（mA/度）”置于较小挡级。测正向特性时，刚好相反。

③ 调节“扫描电压调节”旋钮时，应当较为缓慢，特别是正向特性时更要小心，否则会使二极管损坏。当“扫描量程”置于高电压挡时，测反向特性也要特别小心，否则易使二极管击穿和损坏。

3．几点说明

① 以上所举实例，为一般小功率 NPN 晶体三极管（如 3DG6），若要测 PNP 型的晶体三极管（如 3AX22）时，只需将其极性（扫描信号极性、阶梯信号极性）作相应变化。

② 例中所选各挡位置一般是对小功率 NPN 型晶体管（例如 3DG6）而言。如测其他类型的晶体管，特别是大功率晶体管时，则需根据被测管的具体情况作相应变更。

③ 为了便于比较和选用对管，本机还附有测试盒一只，通过外接测试盒，可对某两个被测晶体管的特性进行比较或挑选。

④ 当测试高频晶体管时，特性曲线可能会出现某些不规则的畸变现象（如顶部下降等），其主要原因是被测晶体管产生了自激。对于频率较低的高频管，手捏被测管外壳，畸变现象即可消失，对于频率更高的管子，则需在三极管 B、E 间或 C、E 间并联一只适当容量（可小到几个 pF）的电容器。

四、使用注意事项

1．在测试前和测试中，应对仪器进行必要的校正（具体方法可参阅有关仪器说明书）。

① X 轴、Y 轴放大器“零点”和“满度”校正。

② 阶梯“零点”的校正。

2．在测试前应对被测管的性能和极限参数有所了解，在测试中应注意被测管是否过热。必要时应加散热片，且测试时间不应过长，否则不仅会影响测试精度，严重过热时还会烧坏管子。

3．在测试中应特别注意“阶梯电流”、“功耗限制电阻”、“扫描量程”三个开关转动的

位置。如位置不当，在测试中会造成被测管损坏。当测小功率管时，如不慎将“阶梯电流”开关置于大于 1 mA/级挡，则晶体管基极易损坏。如“功耗限制电阻”开关置于较小的电阻，且“扫描量程”置于较大的范围（如 0～200 V），晶体管也容易损坏。但是如“功耗限制电阻”开关置于较大的位置（如 10 kΩ），即使“扫描量程”置于 0～200 V 也不至于损坏。

4．测试结束后，应将集电极电压“扫描量程”置于 0～20 V，“扫描电压调节”旋钮旋到零，“功耗限制电阻”开关置于较大位置，“阶梯电流”开关置于较小处，并关掉电源，以防下次使用时，因不慎而损坏被测管。

5．本仪器不适合测试场效应管的特性和参数，主要是基极电流的正负和集电极电压的极性是用一个极性转换开关控制（它是专为测晶体管设置的），不能满足场效应管偏置的要求，若需测场效应管，可用 JT-1 型图示仪测试。其方法与测晶体管特性、参数类似，其管子的接法与晶体管的对应关系如下：E-S、C-D、B-G。特别注意场效应管的栅极输入是电压量，且栅-源之间电阻大的特点。

本　章　小　结

1．示波器由垂直系统、水平系统和主机三大部分组成。

2．示波器显示波形的原理如下：锯齿波电压加到水平偏转板上，它迫使电子束以恒定的速度从左向右沿水平方向偏转，并且很快地返回到起始位置。电子束沿水平方向偏转距离同时间成正比，被测电压加到垂直偏转板上，且被测电压又是时间的函数，因而，每一瞬间电子射线的垂直位置单值地对应于这一瞬间被测信号的值。在锯齿波电压扫描期间，电子束就绘出了被测信号的曲线，当锯齿波的重复周期等于输入信号周期整数倍时，荧光屏上显示出的信号图形是稳定不动的。为了保证锯齿波的周期等于输入信号周期的整数倍，示波器中必须具有同步或触发电路。

3．示波器的垂直系统由探极、衰减器、倒相放大器、前置放大器、延迟级、输出放大器、通道转换器、内触发放大器等电路组成。

4．示波器的水平系统由触发电路（包括触发放大器和触发形成器）、扫描电路（包括时基闸门、扫描发生器、电压比较器和释抑电路）和水平放大器等电路组成。

5．示波器的主机包括示波管及其供电电路、高压电源、低压电源、调节电路和校准信号电路等。

6．XJ4362 型双踪示波器是双踪双扫描便携式通用示波器。

7．数字存储示波器具有存储功能，比模拟存储示波器具有更优越的性能和高的性能价格比。

8．示波器在电磁测量中可以进行电压、电流、时间、相位、频率等电学量的测量。在其他方面的应用也十分广泛。

9．晶体管特性图示仪在测绘输出特性时，基极电流由阶梯波电源提供，集电极扫描电压为 50 Hz 市电全波整流波形，并同时加至示波器的水平系统，则水平轴相当于 U_{CE} 轴。集电极电流的取样电压加至示波管的垂直系统，则垂直轴相当于 I_C 轴。这样，在荧光屏上就可以描绘出晶体管的输出特性曲线族。

10．使用晶体管特性图示仪时，要根据被测管型选择与测量参数有关的开关和旋钮的位置及量程。



思考题与习题

3-1 说明示波管的结构及各部分作用。

3-2 分析示波器显示波形原理。

3-3 示波器包括哪几部分？各部分有何作用？

3-4 何谓触发扫描？它有何优点？

3-5 何谓双踪显示？“交替”显示、“断续”显示各适用于什么场合？

3-6 说明扫描电路的组成及其工作过程。

3-7 说明示波器主要技术性能的含意。

3-8 画方框图说明 XJ4362 型示波器由哪些主要电路组成。它们各起什么作用？

3-9 数字存储示波器有何特点？

3-10 用示波器测电压有哪些方法？试比较这些方法的优缺点。

3-11 如何用示波器测量脉冲信号的时间参数？

3-12 如何用示波器测量两个正弦信号之间的相位差？

3-13 如何用示波器测量频率？

3-14 如果在示波管的 X、Y 两对偏转板上，加入同频、同相、等幅的正弦波，在荧光屏上会出现什么图像？如果两者相位相差 90°，又是什么图像？

3-15 在下述问题的_____中填入适当的答案。

在示波器的 X 轴和 Y 轴上，分别加上交流正弦波电压时，如果这两个电压的____是适当的____数比，那么，在荧光屏上就会出现椭圆、8 字形等各种图形，这种图形称为____图形。如果想直接观测 Y 轴输入电压的波形，X 轴的输入电压必须是____波才行，X 轴的输入电压称为____。

3-16 晶体管特性图示仪能否用正弦波作集电极扫描电压？为什么？

实训参考方案一
电子示波器的使用

一、实训目的

通过实验掌握用示波器测量交流电压的幅度、频率、相位差以及脉冲信号的主要参数。

二、实训器材

1．XD-2 型低频信号发生器

2．XJ4362 型双踪示波器

3．JB-1B 型晶体管电压表

三、实训内容及步骤

（一）测量电压

用 XD-2 低频信号发生器输出任一频率的信号电压，用 XJ4362 双踪示波器进行测量，然后用晶体管电压表 JB-1B 进行测量，比较其测量结果。通过实验进一步掌握示波器面板上 V/div 开关和微调旋钮的使用方法，以及用示波器测量电压的精度和使用范围。

（二）测量频率

1．测量时间确定频率

通过实验掌握用示波器测量时间的方法，并进一步掌握示波器面板上扫速开关“t/div”和微调旋钮的功能及使用方法，“扩展×10”的作用和使用场合。

2．用李沙育图形测量信号频率

通过实验了解李沙育图形与信号频率的关系。指出显示李沙育图形时示波器面板上哪些

开关和旋钮不起作用。

3．比较两种测试结果，说明两种测试方法的优缺点。

（三）测量相位

1．双踪法测量相位

用 XJ4362 双踪示波器测量两个正弦信号的相位差，通过测试说明在示波器上如何同时显示两个信号波形。“断续”和“交替”显示有何区别。

2．用李沙育图形测量相位

通过测试说明李沙育图形与两个正弦信号相位差的关系。

3．比较两种测试结果，说明这两种测试方法的优缺点。

（四）测量脉冲信号

利用 XJ4362 双踪示波器测量脉冲信号的周期、脉宽、幅度和上升时间。

实训参考方案二

半导体分立元件特性和主要参数的测试

一、实训目的

通过实验掌握用图示仪测量半导体二极管、三极管和场效应管等元件的特性曲线和主要参数的方法；复习用万用表简易判断晶体管的电极和质量的方法。

二、实训器材

① 500 型万用表

② QT1 型晶体管特性图示仪

③ 半导体二极管、半导体三极管、半导体稳压管、场效应管

三、实训内容及步骤

① 用万用表判断二极管和三极管的电极和质量的优劣。

ⓐ 任选一个半导体二极管判断其 P、N 极，根据所测的正向电阻与反向电阻值，判定二极管质量的优劣。

ⓑ 任选一个半导体三极管，判断是 PNP 管还是 NPN 管，并判断管子的三个电极，估计放大能力和穿透电流 I_{CEO}的大小。

② 阅读有关资料，了解晶体管特性图示仪的基本原理，熟悉图示仪面板上开关、旋钮的作用和使用方法。

③ 测量二极管的伏安特性，确定门坎电压、反向饱和电流和最大反向电压。

④ 测量稳压管 2DW7C（或根据情况选定）的伏安特性曲线，了解击穿情况，确定稳压值。

⑤ 测量三极管的特性曲线和主要参数

测试晶体三极管 3AX22 和 3DG6 的共发射极输入和输出特性曲线、共基极输出特性曲线、$I_C \sim I_B$ 特性曲线，测出 I_{CBO}、I_{CEO}、BU_{CEO}、α、β 等主要参数。

⑥ 测量场效应管 3DJ6 的输出特性曲线和转移特性曲线，并测出 I_{DSS}、U_P、g_m 等主要参数。

第四章　频率与时间的测量



目的与要求　频率与时间的测量是最基本的测量之一，是目前测量精度最高的测量。本章重点要求掌握利用电子计数器测量频率与时间的测量原理和正确使用方法。

第一节　概　　述

在自然界中，周期性现象是非常普遍的。所谓周期性现象，就是经过一段相等的时间又重复出现相同状态的现象，这一段相等的时间被称为周期。频率是相同的现象在单位时间内重复出现的次数。显然，周期和频率是描述同一周期现象的两个重要参数，因此频率测量和时间测量是紧密相连的。常用的频率测量方法可以分为：比较法测量、利用电路频率特性测量和电子计数器测量。其中利用电子计数器来进行频率测量具有精度高、速度快、使用简便等优点，因而得到了广泛应用。

一、时间与频率的原始基准

时间与频率基准的精确度是所有计量基准中最高的一种，也是复制得最精确，保持得最稳定的一个物理量。

早期的时间频率标准是基于太阳系内天体的运动规律，以地球自转周期的 1/86 400 作为世界时的 1 秒，其准确度在 1×10^{-6}量级。经过改正地轴运动的影响和逐年及季节性的变化后，世界时的准确度可达 1×10^{-9}量级。这种宏观的计时标准需要庞杂的天文设备，操作麻烦，观测周期长，准确度有限。为了寻求更加稳定、又能迅速测定的时间标准，引进了微观计时标准。目前最常用的频率标准有两类：原子频率标准和高精度石英晶体振荡器。

1．原子频率标准

它是利用原子从某种能量状态跃迁到另一种能量状态时，所辐射或吸收的电磁波的频率作为标准时间来计量的。

能量与频率之间存在着如下的量子关系

$$E = hf \tag{4-1}$$

式中　h——普朗克常数。

当原子在 E_2、E_1 两个能级之间跃迁时，就会吸收或释放出一定频率的电磁振荡能量，其频率大小为

$$f = (E_2 - E_1)/h \tag{4-2}$$

由于能级数值是高度准确的，因而所发出的频率也是十分准确的。

目前，常用于原子频标的原子是氢、铯和铷。其中铯原子频标的准确度和再现性都很好，准确度为 5×10^{-13}、稳定度为 2×10^{-13}/h、再现度为 1×10^{-13}，已成为一级原子频率标准。

2．石英晶体振荡器

由于石英晶体具有很高的稳定性，它的振荡频率受外界因素的影响又较小，因而比较稳

定。采用了高品质因数的石英晶体和精密的恒温设备后，高精度石英晶体振荡器的的老化率可达 $1\times10^{-9}\sim3\times10^{-10}$/d，短期稳定性可达 $1\times10^{-10}\sim1\times10^{-11}$/s，可作为二级频率标准。在制造和使用期间，可根据所需精度进行校准。目前石英晶体振荡器已应用在很多电子设备中，作为工作频率基准。例如，电子计数器、频率合成器、发射机等。

频率在所有物理量的测量中是复制得最准确、保持得最稳定、测量得最精确的一个，因而在电子信息技术领域，有着非常重要的地位。

二、电子计数器的分类

电子计数器的功能很多，归纳起来主要有三大功能：测频、测时以及计数。

按功能的不同，电子计数器可以分为四大类。

（1）通用计数器　通用计数器具有多种测量功能，一般具有测频、测周、测时间、测多周期平均、测频率比、测任意时间间隔内的脉冲个数以及累加计数功能。

（2）频率计数器　只具有测量频率单一功能，但它测频范围很宽。如 Marconi 公司的 2240 型微波频率计数器的测频范围达 10 Hz～20 GHz。

（3）时间间隔计数器　以测量时间间隔为基础的计数器，用来测量两个电信号之间的时间间隔，也可以测量一个周期信号的周期、脉冲宽度、占空系数、上升时间和下降时间。

（4）特种计数器　指具有特种功能的计数器。包括可逆计数器、预置计数器、序列计数器以及差值计数器等。

按直接计数的最高频率可以分为四类。

（1）低速计数器　最高计数频率小于 10 MHz。

（2）中速计数器　计数频率范围在 10～100 MHz。

（3）高速计数器　最高计数频率大于 100 MHz。

（4）微波计数器　计数频率范围在 1～80 GHz 或更高。

三、电子计数器技术指标

（1）测试功能　说明该仪器所具备的全部测试功能。一般具有测量频率、测量周期、测量频率比、测量时间间隔、累计脉冲个数以及自校等功能。

（2）测量范围　说明测量的有效范围。对于不同的测量功能，测量范围的含义也不同。测量频率时，常用频率的上限和下限值来表示测量范围；测量周期时，常用周期的最大和最小值表示测量范围。例如，E312A 型电子计数器的测量频率范围是 10 Hz～10 MHz，测量周期的范围是 10 s～0.4 μs。

（3）输入特性　电子计数器通常备有 2～3 个输入端，在测量不同的项目时，信号经不同的通道进入仪器。输入特性标明电子计数器与被测信号源相连的一组特性参数，常包含以下几项。

① 输入灵敏度：一般用能使仪器正常工作的最小输入电压来表示，通用电子计数器的灵敏度一般在 10～100 mV 内。

② 最大输入电压：指仪器所能允许的最大输入电压，超过这个电压仪器将不能正常工作，甚至会损坏。

③ 输入耦合方式：常有 AC、DC 两种耦合方式。DC 耦合适合低频脉冲或随机脉冲信号的测量。

④ 触发斜率选择和触发电平调节：触发斜率分为“+”和“-”，用以选择被测信号的上升沿或下降沿来触发。触发电平调节决定了被测信号的触发点。

⑤ 输入阻抗：由输入电阻和输入电容组成。常分为高阻（1 MΩ//25 pF）和低阻(50Ω)两种。

(4) 测量准确度　常用测量误差表示测量准确度。

(5) 石英晶体振荡器的频率稳定度　石英晶体振荡器是仪器的重要组成部分，其频率稳定度是影响测量准确度的重要因素。常用日稳定度表示，一般在 $\pm 1\times10^{-5}$/d ～ $\pm 1\times10^{-9}$/d。

(6) 闸门时间（门控时间）和时标　标明机内的信号源可以提供的闸门时间（门控时间）和时标有几种。

(7) 显示及工作方式　一般标明显示位数、显示器件以及一次测量完毕的显示持续时间。通常还说明是“记忆”显示方式还是“不记忆”显示方式。记忆显示方式是指只显示一次测量的结果，并将这一结果持续显示到下一次测量结束。而不记忆显示方式是指测量时的计数过程可随时显示出。

(8) 输出　指仪器可以直接输出的时标信号的种类和测量结果如何编码输出。

第二节　电子计数器

一、基本工作原理

电子计数器的基本工作原理是首先将时间或频率进行模拟量-数字量转换（A/D），然后对转换后的数字量（通常以脉冲个数表示）进行计数，最后把结果用数字直接显示出来。

(一) 时间-数字转换原理

把被转换的时间 T_x 与标准时间间隔 t_0 进行比较，取整量化数字 N，即

$$N=\left[\frac{T_x}{t_0}\right]\pm1 \tag{4-3}$$

式中　±1——量化误差。

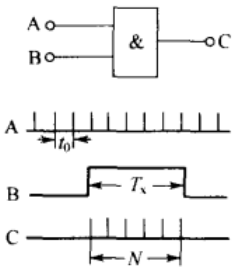


图 4-1　时间-数字转换原理图

比较过程常用一个与门电路来实现，与门有两个输入端 A、B 和一个输出端 C。其工作原理如图 4-1 所示。

若在 A 端加上标准时间间隔 t_0 作为时标信号，在 B 端加上被转换的时间信号 T_x 作为闸门信号（或门控信号）。当闸门信号为零（低电平）时，与门关闭，输入的时标脉冲信号不能通过与门输出；当闸门信号不为零（高电平）时，与门打开，要计数的时标脉冲信号通过与门输出，则 C 端输出 N 个时标脉冲信号，其数字量为 N。

(二) 频率—数字转换原理

把被转换的频率 f_x 与标准频率 F_0 进行比较，取整量化数字 N，即

$$N=\left[\frac{f_x}{F_0}\right]\pm1 \tag{4-4}$$

式中　±1——量化误差。

比较过程同样可用与门电路实现，只需在图 4-1 中的 A 端加上被转换的频率 f_x 作为时

标信号，在 B 端加上标准频率 F_0，其对应的标准时间为 T_0 作为闸门信号，则 C 端输出数字量 N。

由此可见，时间或频率的数字转换原理的实质是一种比较测量，即将被测时间或频率与量化单位的标准时间或频率进行比较，其结果用整量化的数字形式表示出来。

（三）量化误差

将模拟量转换为数字量时所产生的误差叫量化误差，其大小为 ±1 个字。时间或频率的数字转换过程中，量化误差是由于闸门信号起始时刻与量化的脉冲信号之间不同步而引起的，使得在同样闸门时间内，计数电路可能多计一个或少计一个数字，从而造成计数值 N 会产生 ±1 个字的量化误差。如图 4-2 所示。

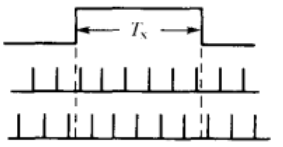
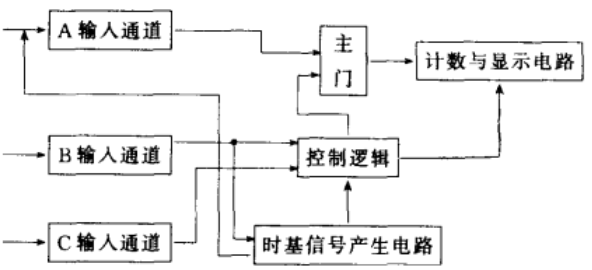


图 4-2　量化误差的形成

图 4-2 中宽度同为 T_x 的闸门信号，由于通过主门时与计数脉冲不同步而带来的计数值一个为 6，一个为 5，相差 1 个字。

二、电子计数器基本组成

根据时间或频率的模-数字转换原理，构成一个电子计数器应当包含五个主要组成部分，如图 4-3 所示。



（1）输入电路　又称为输入通道。它首先将被测信号，如正弦波、三角波、锯齿波等波形，放大和整形为脉冲信号，其重复频率等于被测信号的频率。一般包含两到三个通道，其中 A 通道用于传输被计数的信号，B、C 通道用于传输控制主门打开的闸门信号。

（2）主门电路　主门常是一个可控制的与门电路，要计数的脉冲信号加到一个输入端，闸门信号加到另一个输入端，利用主门的“打开”与“关闭”可产生多种测量功能。

（3）时基信号的产生与变换电路　标准时间间隔 t_0 和标准频率 F_0 是由时基电路产生的。它有两个要求：首先是要有足够的准确度与稳定度；其次是要求多值性，要求有多种标准时间间隔 t_0 和标准频率 F_0 与输入量相比较。常用石英晶体振荡器来获得足够的准确度与稳定度的时间标准信号，再采用多个分频器和倍频器得到多个标准时间信号。例如，计数用的时标信号常有 1 μs、10 μs、0.1 ms、1 ms 等；闸门信号常有 1 ms、10 ms、0.1 s、1 s、10 s 等。

（4）计数与显示电路　对主门输出的脉冲个数 N 进行计数，并以十进制计数方式显示出来。

（5）控制逻辑电路　产生各种控制信号，协调各部件电路的工作，使计数器按照人们编排的工作程序：计数-显示-复零-准备下一次测量来进行工作。

三、电子计数器测量功能

（一）测量频率功能

按照频率的定义，周期信号的频率是指在单位时间内，信号周期变化的次数。如果在规

定的时间 T_0 内，统计出信号重复的周期数为 N，则信号的频率为

$$f_x = N/T_0 \tag{4-5}$$

例如，时间 $T_0=1$ s，测得 $N=10\ 000$，则信号频率 $f_x=10\ 000$ Hz。

电子计数器测量频率的方法就是根据频率的基本定义来进行测量的，其原理方框图如图 4-4 所示。被测信号 f_x 送入 A 通道放大、整形，形成的计数脉冲加至主门 A 端，适当选择分频器所产生的闸门时间 T_0，得到计数值 N。

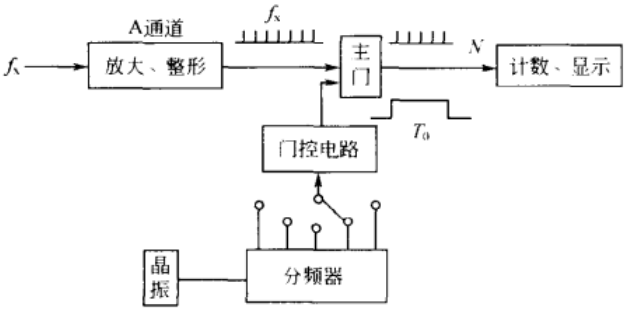


图 4-4　测量频率原理方框图

对于同一被测信号，如果选择不同的闸门时间，则计数值 N 是不同的。例如，被测信号 $f_x=1\ 000\ 000$ Hz，当 $T_0=1$ s 时，测得 $N=1\ 000\ 000$，若显示器的单位采用 kHz，则显示 1 000.000 kHz；当 $T_0=0.1$ s 时，则测得 $N=100\ 000$，显示 1 000.00 kHz；当 $T_0=10$ s 时，则测得 $N=10\ 000\ 000$，显示 1 000.000 0 kHz。

（二）测量周期功能

测量周期原理方框图如图 4-5 所示。被测信号 T_x 送入 B 通道放大、整形形成控制主门打开的闸门信号，选择适当的时标信号 t_0，在周期 T_x 的时间内对时标信号 t_0 计数，其计数结果为 N，则被测周期为

$$T_x = Nt_0 \tag{4-6}$$

例如，被测信号 $T_x=10$ ms，当 $t_0=1$ μs 时，测得 $N=10\ 000$，若显示器的单位采用 ms，则显示 10.000 ms。

如果待测频率较高，周期较短时，则还可以用测量多周期的方法提高测量精度。在多周期测量中，B 通道和门控之间插入 n 级十分频器，即周期倍乘率，把开关门时间扩展 10^n 倍。多周期测量法测出的结果实际上是对多个周期的平均值，即

$$T_x = Nt_0/10^n \tag{4-7}$$

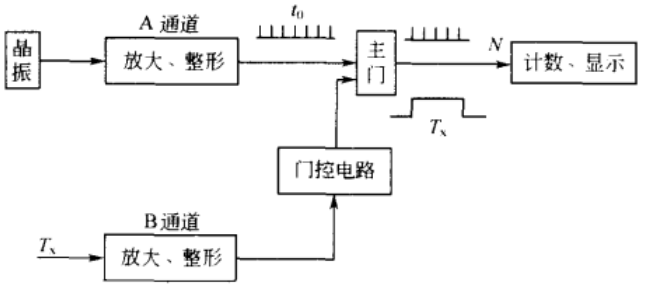


图 4-5　测量周期原理方框图

周期倍乘率通常有×1、×10、$\times 10^2$、10^3 以及 $\times 10^4$ 等。

（三）测量频率比功能

频率比是指 A、B 两路信号的频率之比，其原理方框图如图 4-6 所示。测量频率比的实质为测量 B 信号的一个周期内所通过的 A 信号的脉冲个数，即

$$N = f_A / f_B \tag{4-8}$$

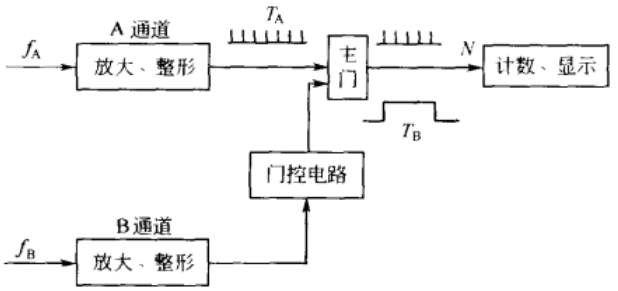


图 4-6　测量频率比原理方框图

进行频率比测量时需注意 $f_A > f_B$。例如，在调试分频电路或倍频电路时，只需把未经分频或经倍频的信号送入 A 通道，而将分频后或未经倍频的信号送入 B 通道，应用频率比测量的功能，就可以测得电路的分频或频倍频系数。

与测量周期一样，为了提高频率比的测量精度，也可扩大被测信号 B 的周期。如果周期倍乘率放在 $\times 10^n$ 上，测出

$$N = 10^n f_A / f_B \tag{4-9}$$

（四）测量时间间隔功能

测量时间间隔的原理方框图如图 4-7 所示。测量 B、C 两路信号间的时间间隔是分别由这两路信号控制门控双稳电路，其中 B 信号到来时打开主门，A 通道送入时标脉冲，C 信号到来时关闭主门，得到计数值 N。则被测时间间隔为

$$t_{B\text{-}C} = N t_0 \tag{4-10}$$

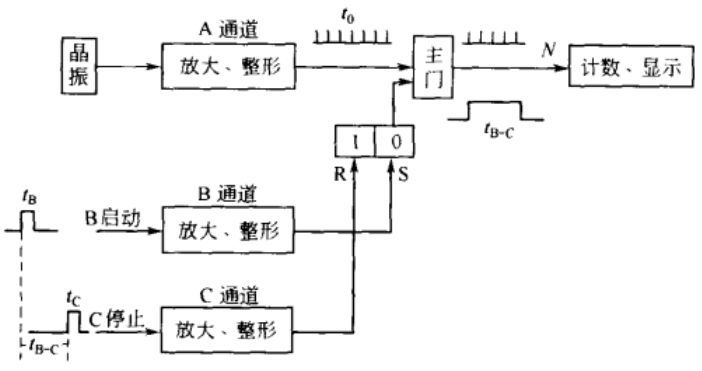
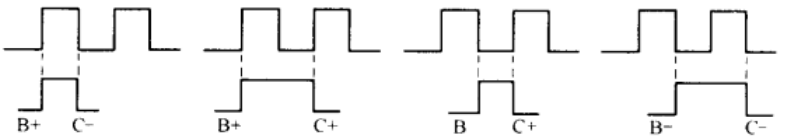


图 4-7　测量时间间隔原理方框图

为了增加测量的灵活性，B、C 通道内分别装有极性选择和电平调节开关。可以选择两个输入信号的上升沿和下降沿以及沿上某电平点作为时间间隔的起始点和终点，因而可以测量两输入信号上任意两点之间的时间间隔。如果要测量一个输入信号的任意两点之间的时间

间隔，例如测量脉宽，如图 4-8（a）所示，则应把该信号分别送入 B、C 两通道，再分别选取 B 通道的触发极性为“+”，C 通道的触发极性为“-”。



(a)B 正触发 C 负触发　(b)B、C 均正触发　(c)B 负触发 C 正触发　(d)B、C 均负触发

图 4-8　脉冲宽度的测量

（五）自校功能

自校是电子计数器对机内基准信号源进行测量的一种功能，用以检查自身的逻辑功能是否正常。自校和测量频率的原理相同，计数器的读数也为频率数，但不同之处在于，自校中的闸门时间是石英晶体振荡器经分频得到的，可以取不同值，时标信号也是石英晶体振荡器产生的。例如时标信号的周期为 0.1 μs，若取闸门时间为 1 s，则自校的读数为10 000.000 kHz；若取闸门时间为 0.1 s，则自校的读数为 10 000.00 kHz。

四、电子计数器的测量误差

电子计数器是一种高精度的数字化测量仪器，其精度可达 $10^{-7}\sim10^{-13}$数量级。通用计数器有各种功能，它们的测量误差是不同的。下面仅对测量频率和测量周期的误差进行分析。

（一）测量频率误差

测量频率是在标准时间内累计脉冲的个数，即 $f_x = N/T_0$。很显然，测量频率误差的来源不外乎两个方面。

1．闸门时间误差

它是由闸门时间 T_0 是否准确、稳定而带来的。由前面的工作原理分析可知，闸门时间信号是由晶体振荡器产生的标准频率经过分频而获得的，所以闸门时间的准确度取决于晶体振荡器的频率准确度和稳定度，即闸门时间误差等于晶体振荡器输出频率的误差为

$$\frac{\Delta T_0}{T_0} = \frac{\Delta f_0}{f_0} \tag{4-11}$$

因为 $N = f_x T_0$，如果 T_0 准确等于 1 s，则有读数 $N = f_x$；如果 T_0 产生了误差 ΔT_0，则频率读数误差为

$$\Delta N = f_x \Delta T_0 = f_x \frac{\Delta f_0}{f_0} T_0 \tag{4-12}$$

从这里可以估算 $\Delta f_0/f_0$ 对 ΔN 的影响。例如，当 $\Delta f_0/f_0 = 2\times10^{-7}$，$T_0 = 1$ s 时，对于 $f_x = 1$ MHz，读数误差 $\Delta N = 0.2$ Hz；对于 $f_x = 10$ MHz，读数误差 $\Delta N = 2$ Hz；而对于 $f_x = 100$ MHz，则读数误差 $\Delta N = 20$ Hz。可见为了保证测量精度，必须选用高准确度和高稳定度的石英晶体振荡器。

2．量化误差

是由通过主门后的计数脉冲个数 N 是否准确而带来的，最大为 +1 Hz。由量化误差所产生的读数误差为

$$\frac{\Delta N}{N}=\frac{\pm 1}{N}=\frac{1}{f_x T_0} \tag{4-13}$$

被测频率越高，闸门时间越长，则量化误差对测量频率带来的误差越小，测量精度越高。由此为了减小测量频率误差，应选用较长的闸门时间。当被测频率 f_x 很低时，应采用测量周期的方法来减小误差。

测量频率总的误差可表示为

$$\frac{\Delta f_x}{f_x}=\pm\left(\frac{1}{f_x T_0}+\left|\frac{\Delta f_0}{f_0}\right|\right) \tag{4-14}$$

（二）测量周期误差

由周期的测量原理 $T_x=Nt_0$ 可知，测量周期误差来源有 3 个。

1．时标误差

它是指时标信号 t_0 不准确而引起的误差。同闸门时间一样，时标信号也是由石英晶体振荡器产生的标准频率经倍频或分频而得到的，所以时标信号的准确度也是由石英晶体振荡器的准确度和稳定度决定的。

2．量化误差

在周期测量中，±1 个字的量化误差所带来读数误差为

$$\frac{\Delta N}{N}=\frac{\pm 1}{N}=\pm\frac{t_0}{T_x}=f_x t_0 \tag{4-15}$$

由上式可见，在周期测量中，时标信号一定时，被测信号频率越低，周期越长，则量化误差越小。因此，当被测频率很低时，宜采用测量周期的方法来减小量化误差的影响。

若采用多周期测量，则读数误差变为

$$\frac{\Delta N}{N}=\pm\frac{t_0}{KT_x} \tag{4-16}$$

式中　K——周期倍乘率。

采用多周期测量可以进一步减小量化误差。总的来说，测量高频信号可采用测频法；测量低频信号可采用测周法。

当使用测频法和测周法测量频率时，欲使其误差相等，则需提供一个测量频率和测量周期的分界点，此分界点的频率称为“中界频率”。计算方法如下

$$f_m=f_x=\sqrt{\frac{Kf_0}{T_0}} \tag{4-17}$$

式中　f_m——中界频率；

f_x——被测信号频率；

K——周期倍乘率；

f_0——时标频率；

T_0——闸门时间。

由于闸门时间的多值性，电子计数器有多个中界频率。

3．触发误差

在周期测量中，闸门时间是由被测信号控制的，只有当闸门时间正好等于被测信号的一个周期或多个周期时，闸门时间才是准确的。但是，当被测信号上叠加有噪声、通过输入通

道的整形电路的触发灵敏度变动或者触发电平漂移时，都会使触发时刻发生抖动，使得触发时刻可能被提前或推迟，从而造成闸门时间不能准确地等于被测信号的周期，于是就产生了触发误差。

根据随机误差的合成定律，可得总的触发误差为

$$\Delta T_x = \frac{T_x U_n}{\pi U_x} \tag{4-18}$$

式中 U_n——被测信号上叠加的噪声幅度；

U_x——被测信号的幅度。

由上式可见，触发误差与信噪比 U_x/U_n 成反比，信噪比越大，触发误差越小。例如，$U_x/U_n=100$，即信噪比为 40 dB 时，$\Delta T_x/T_x \approx 0.32\%$。采用多周期测量同样也可以减小触发误差。

测量周期总的误差为

$$\frac{\Delta T_x}{T_x} = \pm\left(\left|\frac{\Delta f_0}{f_0}\right| + \frac{U_n}{K\pi U_x} + \frac{t_0}{KT_x}\right) \tag{4-19}$$

从上面的分析可知，误差是电子计数器不可避免的。因此，还常利用一些其他的测量技术或方法来减小甚至消除某些误差的影响，如游标法、内插法等。下面仅简要介绍游标法的测量原理。

（三）游标法

1．游标法

用游标法测量时间间隔的原理，与用游标卡尺测量机械长度的原理是相同的。它使用两个时钟信号，其频率分别为 $f_1=1/T_1$，$f_2=1/T_2$。f_1 和 f_2 非常接近，频率较低的 f_1 是主时钟，频率较高的 f_2 是游标时钟。两个时钟信号均是在外信号的触发下由触发振荡器产生。用位于被测时间起点的起始脉冲触发主时钟振荡器，用位于终点的停止脉冲触发游标时钟振荡器。开始时主时钟信号将导前于游标时钟信号，但因为 $f_1<f_2$，故游标时钟信号将逐渐追上主时钟信号，到符合点时两信号相位完全相同，如图 4-9 所示。再利用两个计数器分别计出起始点到符合点的脉冲个数 N_1 和停止点到符合点的脉冲个数 N_2。由于计数器闸门的启闭与时钟同步，因此不产生量化误差，提高测时精度。

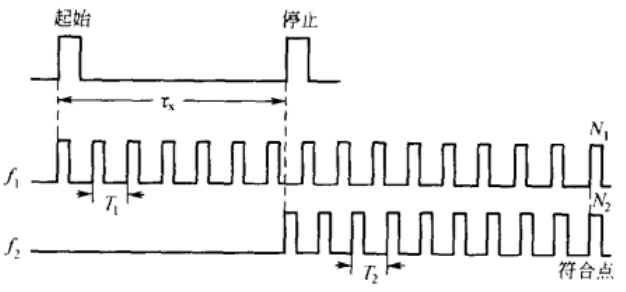


图 4-9 游标法测量时间间隔原理图

$$\begin{aligned}\tau_x &= N_1 T_1 - N_2 T_2 \\ &= (N_1 - N_2) T_1 + N_2 \Delta T\end{aligned} \tag{4-20}$$

式中 $\Delta T = T_1 - T_2$。

ΔT 为量化分辨力，主时钟和游标时钟信号的周期越接近，则量化分辨力越高。

2．双游标法

采用双游标法测量时间间隔，和上述的测量原理类似。其测量原理如图 4-10 所示，f_0 为标准脉冲，用起始脉冲触发振荡器Ⅰ得到游标脉冲 f_{01}，因为 $f_0 > f_{01}$，游标脉冲将逐渐延迟与标准脉冲 f_0 在符合点 1 符合，计数器计得 N_1；同样当停止脉冲到来时，触发振荡器Ⅱ得到游标脉冲 f_{02}（$f_{02} = f_{01}$），同样游标脉冲 f_{02} 将逐渐延迟与标准脉冲 f_0 在符合点 2 符合，计数器计得 N_2。与此同时，利用两个符合点去控制计数器，计得 N_0 个标准脉冲。由此被测时间间隔为

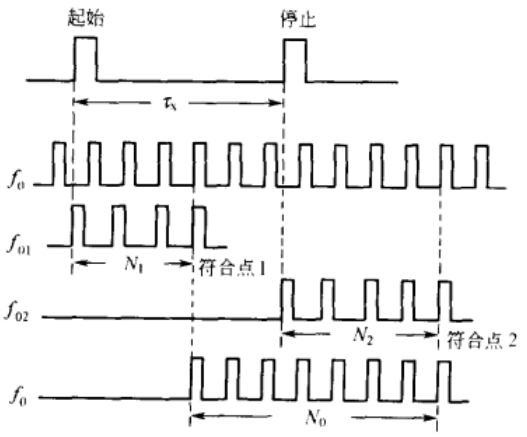


图 4-10　双游标法测量时间间隔原理图

$$\begin{aligned}\tau_x &= N_0 T_0 + N_1 T_{01} - N_2 T_{02} \\ &= N_0 T_0 + (N_1 - N_2) T_{01}\end{aligned} \tag{4-21}$$

第三节　E312B 型通用电子计数器

一、概述

E312B 型通用计数器是一种频率和时间测量的仪器，它以 89C52 单片机为核心进行功能转换、测量控制和数据处理及显示，同时采用倒数技术，实现了全频带范围的等精度测量。

E312B 型通用计数器按测量频段分类，共有四种机型，见表 4-1。

表 4-1　E312B 型通用计数器分类

型　号	频　率　范　围		
	A 输入通道	B 输入通道	C 输入通道
E312B00	0.1 Hz～10 MHz	0.1 Hz～10 MHz	
E312B01	0.1 Hz～100 MHz	0.1 Hz～10 MHz	
E312B05	0.1 Hz～100 MHz	0.1 Hz～10 MHz	100～500 MHz
E312B10	0.1 Hz～100 MHz	0.1 Hz～10 MHz	100～500 MHz

二、主要技术指标

1．输入通道特性

（1）测量频率范围（A、B 通道）

DC 耦合：0.1 Hz～10 MHz/100 MHz

AC 耦合：100 Hz～10 MHz/100 MHz

（2）测量周期范围　100 ns～10 s

（3）输入阻抗　1 MΩ//45 pF

（4）输入幅度范围

正弦波：30 mVrms～2 Vrms(＜80 MHz)　50 mVrms～2 Vrms（＞80 MHz）

脉冲波：90 mV_{p-p}～6 $V_{p\ p}$(＜80 MHz)　150 mV_{p-p}～6 V_{p-p}（＞80 MHz）

（5）触发电平　±1.5 V 步进 30 mV 递增或递减可调

（6）极性：＋、－

2．C 通道输入特性

（1）测量频率范围　100 MHz～1 GHz

（2）输入幅度范围　30 mVrms～1.5 Vrms

（3）输入阻抗　50 Ω

3．周期测量：100 ns～10 s

（1）预选闸门时间　10 ms、100 ms、1 s、10 s 四挡

（2）测量时间　T_m 为测量时间、T_g 为预选闸门时间，ΔT_x 为预选闸门关闭与紧跟来的被测信号的终止触发电平所需时间。当 $T_x < T_g$ 时，$T_m = T_g + \Delta T_x$；当 $T_x > T_g$ 时，$T_m = T_x$

（3）测量误差　±时基准确度±触发误差×被测频率或被测周期±（100 ns/闸门时间）×被测频率或被测周期

4．时间间隔测量

（1）测量范围　200 ns～100 s

（2）测量时间　同周期测量

（3）测量误差　时间间隔±时基准确度±触发误差×T_1±100 ns

5．频率比测量 B/A

（1）测量范围　1～$10^{8}-1$；频率：0.1 Hz～10 MHz（$f_B > f_A$）

（2）测量时间　同周期测量

6．累加计数

（1）计数容量　$10^8 - 1$

（2）输入频率　≤10 MHz

7．晶体振荡器

（1）标称频率　5 MHz

（2）一周平均日老化率　1×10^{-8}/日

8．显示　8 位、单位为 MHz、kHz、ms、μs、ns

三、工作原理

E312B 型通用计数器是由测量计数、微处理控制器、操作键盘以及显示部分组成。其原理方框图如图 4-11 所示。

其基本测量原理如下：首先由微处理器发出预备信号，由被测信号的上升沿触发 E 同步门，主门 E 开放，E 计数器开始计数，同时由时钟脉冲（10 MHz）的上升沿触发 T 同步门，主门 T 开放，T 计数器开始计数，当 T 计数器累计到了预定闸门时间所需的脉冲个数（$N_1 = T/100$ ns）时，微机发出解除预备信号，在紧接着来的被测信号的上升沿作用下，E 同步门关闭，E 计数器停止计数，此时 E 计数器累计到 N_e 个脉冲，同时 T 同步门在紧接着来的时钟脉冲作用下而关闭，测量结束转而由微机进行取数、数据处理和显示。闸门时间关

系如图 4-12 所示。

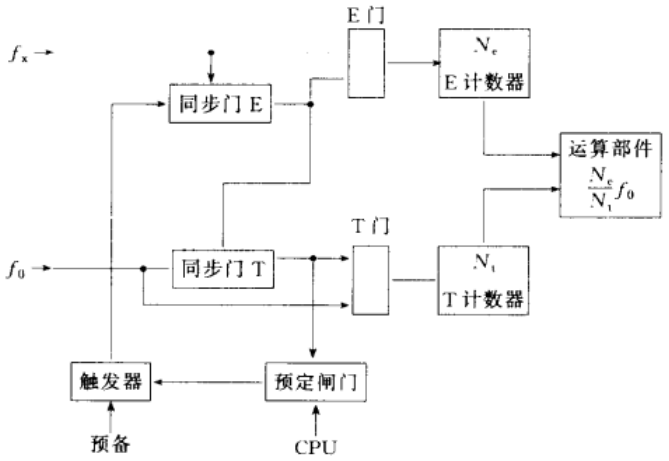


图 4-11　E312B 原理方框图

从上面的测量结果看出，在测量时间 T 内，E 计数器累计了 $N_e = f_x T$ 个被测脉冲信号，T 计数器累计了 $N_t = f_0 T$ 个时钟脉冲，由运算部件算出

$$f_x = \frac{N_e}{N_t} f_0 \text{ 或 } T_x = \frac{N_t}{N_e} T_0 \qquad (4\text{-}22)$$

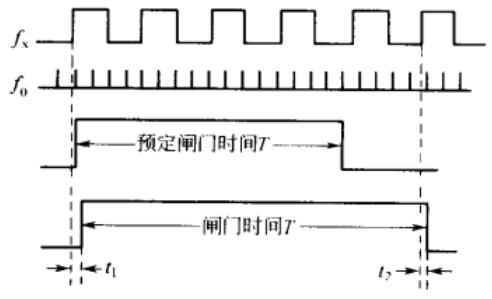


图 4-12　闸门时间关系

本仪器频率、周期的测量原理是完全相同的，只是微处理器对从 N 和 T 计数器中取出的数据的计算方法不同而已。每次测量闸门时间 T 总是被测信号周期的整数倍，消除了普通计数器测频时 ±1 个被测信号周期的量化误差，而存在的误差表现为：实际的闸门时间为 $T + (t_1 - t_2)$，则误差为 $\Delta t = t_1 - t_2$，而 $|t_1 - t_2| \leqslant 100$ ns，所以采用倒数的计数方法就将测量误差从 ±1 个被测信号周期转变为 ±100 ns，在任何一挡预选闸门时间内系统量化误差值为 100 ns，因而在同一闸门时间内对不同频率的测量分辨率均等。

四、使用说明

① 仪器插上电源线后，按下“POWER”电源开关，仪器接通电源，开始进入初始化，并显示本仪器的型号“E312B”，仪器进入“CHK”自校状态。

② 频率测量　按下“FREQ”测量频率键，显示器上显示“FREQ”和 CHA，选择“GATE”闸门选择键，显示器显示“GATE”闪动，用“←→”键来选择所需闸门，按一下依次为 10 ms、100 ms、1 s、10 s，然后按“#”键确定。将被测信号送入 A 输入端（0.1 Hz～100 MHz），若被测信号大于 10 MHz，按下输入频段键“K4 100 M/10 M”，灯亮为测量大于 10 MHz 的信号（E312B00 无此功能）。若被测信号大于 100MHz，按频率选择键“FREQ”并选择输入通道 CHC，将输入信号送入 C 通道测量（E312B05、E312B10 有此功能）。

③ 周期测量　按下“PER”测量周期键，显示器上显示“PER”和 CHA，将小于 10 MHz 的被测信号送入 A 通道，测量过程同频率测量。

④ 时间间隔测量：选择“T_1”测量时间间隔键，根据测量方式可选择“K9 COM”键，按下此键，灯亮，仅A通道输入被测信号，显示器显示CHA，选择触发沿的状态，可用于测量一个脉冲信号的脉冲宽度；灯灭，A、B双通道输入被测信号，显示器显示CHAB，同样选择触发沿的状态，可用于测量两个脉冲信号间的时间间隔。选择触发沿可按下“K1”、“K6”键，灯亮，选择上升沿；灯灭，选择下降沿。时间间隔的测量建议使用“DC耦合”，按下“K3”、“K8”键，灯亮为DC耦合，否则为AC耦合。

⑤ 频率比测量　按下“B/A”频率比测量键，选择双通道测量。注意 f_B 应大于 f_A。

⑥ 累计测量　按下“TOT”累计测量键，将信号送入A通道，计数开始。在计数过程中，再按下“TOT”键，计数结束。计数结束后，再按下“TOT”键，新的计数开始。在计数过程中，按下“STOP”键，计数暂停，再按一下，计数在原来的基础上累计。

⑦ 触发电平的设置　仪器进行测量的过程中，按下“CH”键，显示CHA或CHB。分别表示A和B输入通道的触发电平设置。按“↑”，表示触发电平步进递增30 mV；“↓”表示触发电平步进递减30 mV。按“#”键，进行触发电平选择，若设置电平指示灯亮，表明预置电平状态；灯灭，则表示设置进入预置0电平状态。

⑧ 衰减设置：按下“K2”“K7”键，灯亮，输入信号衰减20倍；灯灭，输入信号不衰减。

本　章　小　结

1．频率是电子技术中最基本的参量之一，时间与频率基准的精确度是所有计量基准中最高的一种。目前最常用的频率标准有两类：原子频率标准和高精度石英晶体振荡器。

2．电子计数器按照功能分为：通用计数器、频率计数器、时间间隔计数器和特种计数器。

3．电子计数器的主要技术指标有：测试功能、测量范围、输入特性、测量准确度、石英晶体振荡器的频率稳定度、闸门时间和时标以及输出等。

电子计数器的基本工作原理是比较测量法，将待测的时间和频率与标准的时间间隔和标准频率进行比较，得到整量化数字 N。

4．电子计数器由于闸门信号和计数信号的不同，而具有：测频、测周、测时间间隔、测频率比、自校等多种测量功能。

5．电子计数器测量频率的误差主要有：量化误差和闸门时间误差。电子计数器测量周期的误差主要有：量化误差、时标误差和触发误差。减小误差的方法是：增加计数值、提高信噪比和选用高精度的标准频率。使测频和测周误差相等的频率称为中界频率。

6．利用游标法测量时间间隔可以消除量化误差并提高测量精度。

7．E312B型通用电子计数器的使用。

思考题与习题

4-1　电子计数器按功能的不同可分为哪几类？

4-2　电子计数器的时间标准信号有什么特点？它是如何实现的？

4-3　为什么说电子计数器“测频”的工作原理实质上是一种比较测量法？当闸门时间变化时为什么面板上小数点要变化？有何规律？

4-4　周期倍乘率的工作原理是什么？为什么要倍乘？

4-5　为什么自校功能可以起到检查计数器的工作是否正常的作用？显示的数字是什么信号？

4-6　如何估算测频误差？为什么在测量较低频率时应当采用周期测量？

4-7　用一电子计数器测量 f_x = 1 MHz 的信号频率，当选定的闸门时间分别为 1 s、0.1 s、10 ms 时，计算由 ±1 个字的量化误差引起的测频误差分别为多少？

4-8　如何估算测周误差？为什么要采用多周期测量？

4-9　已知被测信号的周期为 100 μs，计数值为 100 000，时标信号频率为 1 MHz，若采用同一周期倍乘和同一时标信号去测另一未知信号，已知计数值为 20 000，求未知信号的周期？

4-10　为什么游标法中能获得很高的测时分辨力？

实训参考方案

电子计数器的使用

一、实训目的

1．掌握电子计数器的基本使用方法。

2．利用电子计数器进行实际测量。

二、实训器材

1．双踪示波器　1 台

2．脉冲信号发生器或函数信号发生器　1 台

3．低频信号发生器　1 台

4．电子计数器　1 台

三、实训内容及步骤

利用已给的各信号源作为待测信号，用示波器监视各信号的波形大小以及周期，用电子计数器完成以下的测试任务。

（1）自校　选择电子计数器的自校功能，改变闸门时间，记录计数器的显示值。

（2）测频　选择电子计数器的测频功能，用信号源作为待测信号，为减少测量误差应选择频率的高端进行测量，注意调节衰减器的大小，使计数器可靠触发。适当选择计数器的闸门时间，使显示器有效位数尽量多。改变输入信号频率，将计数器读数记录下来。

（3）测周期　选择电子计数器的测周期功能，用信号源作为待测信号，为减少测量误差应选择频率的低端进行测量，注意调节衰减器的大小，使计数器可靠触发。适当选择计数器的周期倍乘率，使显示器有效位数尽量多。改变输入信号频率，记录计数器的读数。

（4）测频率比　选择电子计数器的测频率比功能，利用低频信号发生器的输出作为 A 信号，脉冲信号发生器的输出作为 B 信号，适当选择 B 信号的频率，固定为一值，改变 A 信号的大小，记录计数器的读数。

（5）测时间间隔　选择电子计数器的测时间间隔功能。

① 利用脉冲信号发生器的正脉冲 A 或 B 作为待测信号，选择不同的触发沿，调节触发电平，使计数器可靠工作，记录脉冲信号各沿间的时间间隔。

② 利用脉冲信号发生器的同步脉冲和 B 脉冲两脉冲作为待测信号，选择不同的触发沿，调节触发电平，使计数器可靠工作，记录下两脉冲信号各沿间的时间间隔。

（6）累加计数　选择电子计数器的累加计数功能，利用任一信号源均可作为计数信号，观察计数功能。

第五章　电压测量技术



目的与要求　电压是表征电信号能量大小的基本参量之一，电压测量是其他电参量测量的基础。本章重点要求掌握电压的基本测量原理和各种电压测量仪表的正确使用。

第一节　概　　述

电压、电流、功率是表征电信号能量大小的三个基本参量。在电子电路中，只要测量出其中一个参量就可以根据电路的阻抗求出其他两个参量。考虑到测量的方便性、安全性、准确性等因素，几乎都用测量电压的方法来测定表征电信号能量大小的三个基本参量。此外，许多参数，例如频率特性、谐波失真度、调制度等都可视为电压的派生量。所以电压的测量是其他电参量（包括非电量）测量的基础。

一、电压测量的特点和基本要求

电子电路中的电压具有频率范围宽、幅度差别大、波形多样化等特点，所以对测量电压所采用的电子电压表也提出了相应的要求，主要有下面几项。

1．频率范围宽

被测信号电压的频率可以从0到千兆赫兹范围内变化，这就要求测量信号电压仪表的频带要覆盖较宽的频率范围。

2．量程宽

通常，被测信号电压小到微伏级，大到千伏以上。这就要求测量电压仪表的量程相当宽。电压表所能测量的下限值定义为电压表的灵敏度，目前只有数字电压表才能达到微伏级的灵敏度。

3．输入阻抗高

电压测量仪表的输入阻抗是被测电路的附加并联负载。为了减小电压表对测量结果的影响，就要求电压表的输入阻抗很高，即输入电阻大，输入电容小，使附加的并联负载对被测电路影响很小。

4．测量精度高

一般的工程测量，如市电的测量、电路电源电压的测量等都不要求高的精度。但对一些特殊电压的测量却要求有很高的测量精度。如对A/D变换器的基准电压的测量，对稳压电源的稳压系数的测量都要求有很高的测量精度。

5．抗干扰能力强

测量工作一般都在有干扰的环境下进行，所以要求测量仪表具有较强的抗干扰能力。特别是高灵敏度、高精度的仪表都要具备很强的抗干扰能力，否则就会引入明显的测量误差，达不到测量精度的要求。对于数字电压表来说，这个要求更为突出。

二、电压表的分类

电压表按其工作原理和读数方式分为模拟式电压表和数字式电压表两大类。

1．模拟式电压表

模拟式电压表又叫指针式电压表，一般都采用磁电式直流电流表头作为被测电压的指示器。测量直流电压时，可直接或经放大或经衰减后变成一定量的直流电流驱动直流表头的指针偏转指示。测量交流电压时，必需经过交流-直流变换器即检波器，将被测交流电压先转换成与之成比例的直流电压后，再进行直流电压的测量。

模拟式电压表按检波方式分为均值电压表、有效值电压表和峰值电压表。按电压表电路组成的方式也可分为检波-放大式电压表、放大-检波式电压表、外差式电压表三类。

特别注意：不管哪类模拟式电压表，都要将被测信号电压转换成直流电流通过表头才能测量出电压结果。所以，测量机构（表头）、测量线路以及转换开关是模拟式电压表不可缺少的组成部分。

2．数字式电压表

数字式电压表实际上就是一种用 A/D 变换器作测量机构，用数字显示器显示测量结果的电压表。测量交流电压及其他电参量的数字式电压表必须在 A/D 变换器之前对被测电参量进行转换处理，将被测电参量变换成直流电压。

A/D 变换器是数字式电压表的核心部分，它的变换精度、分辨力、抗干扰能力直接影响数字式电压表的测量精度、灵敏度和抗干扰能力。

除采用电压表之外，还可用示波器等来进行电压测量。

三、交流电压的基本参数

交流电压的峰值、平均值和有效值是交流电压的基本参数，一个交流电压的幅度特性可用峰值、平均值、有效值基本参数和与基本参数相关的波形因数、波峰因数等参数来表征。

1．峰值 U_p

一个周期性交流电压 $u(t)$ 在一个周期内所出现的最大瞬时值称为该交流电压的峰值 U_p。峰值 U_p 是参考零电平计算的。有正峰值和负峰值之分，分别用 U_{p+} 和 U_{p-} 表示。

含直流分量的交流电压，其正峰值 U_{p+} 和负峰值 U_{p-} 的绝对值大小是不相等的；与交流电压的振幅值 U_m 也是不相等的。但当交流电压的直流分量为零时，其正峰值 U_{p+} 和负峰值 U_{p-} 的绝对值及交流电压的振幅值 U_m 都是相等的。这里要特别注意峰值 U_p 与振幅 U_m 的区别，区别点在参考电平不相同，峰值 U_p 是相对于零电平值，而振幅 U_m 是相对于直流分量值。

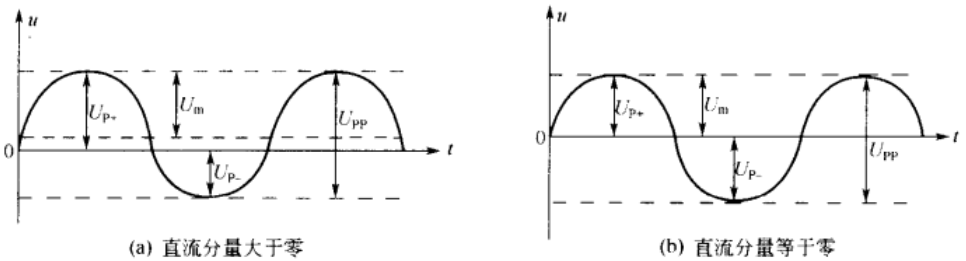
不同情况下的峰值与振幅值的含义如图 5-1 所示。其中，图 5-1(a) 的直流分量大于零；图 5-1(b) 的直流分量等于零。

2．平均值 $\overline{U}$

交流电压的平均值在数学上定义为

$$\overline{U} = \frac{1}{T}\int_0^T u(t)\mathrm{d}t \tag{5-1}$$

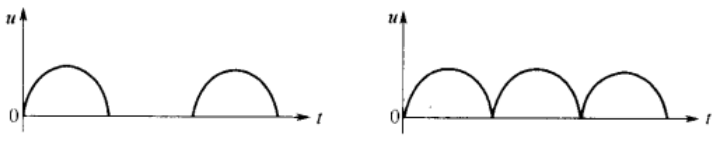
显然，不含直流分量的正弦信号的电压平均值为零。用这种定义来表征正弦信号的幅度就没有实际意义的。所以在实际的测量中是用检波后的平均值来表征正弦信号的幅度特性。



(a) 直流分量大于零　　(b) 直流分量等于零

图 5-1　交流电压的峰值与振幅值

检波分半波检波和全波检波，检波后的波形如图 5-2 所示。



(a) 半波整流波形　　(b) 全波整流波形

图 5-2　正弦信号经检波后的波形

通常用全波检波后的波形的平均值来表征正弦信号的幅度特性，故有

$$\overline{U} = \frac{1}{T}\int_0^T \left| u(t) \right| \mathrm{d}t \tag{5-2}$$

半波检波后的平均值是全波检波后的平均值的一半，即为正弦信号电压平均值的一半。上述以理想正弦信号为典型例子定义平均值，实际上各种交流信号波形电压的平均值都是用式（5-2）定义。

3．有效值 U

交流电压的有效值理论上定义为：交流电压加在某个电阻上产生的功率与一个直流电压在同一个电阻上产生的功率相同时，则定义这个直流电压值为该交流电压的有效值。数学上交流电压的有效值定义为它的方均根值。

$$U = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2(t)\mathrm{d}t} \tag{5-3}$$

没有特殊说明时，交流电压的测量值都是指有效值。

4．波形因数 K_f

交流电压的有效值与平均值之比称为该交流电压的波形因数，用 K_f 表示。

$$K_f = \frac{U}{\overline{U}} \tag{5-4}$$

正弦信号的波形因数 $K_f = 1.11$

三角波的波形因数　　$K_f = \dfrac{2}{\sqrt{3}}$

方波信号的波形因数　　$K_f = 1$

5．波峰因数 K_p

波峰因数 K_p 定义为峰值与有效值之比

$$K_p = \frac{U_p}{U} \tag{5-5}$$

正弦信号的波峰因数　　$K_p=\sqrt{2}$

三角波的波峰因数　　$K_p=\sqrt{3}$

方波信号的波峰因数　　$K_p=1$

第二节　模拟式交流电压表

一、模拟式交流电压表的分类

在模拟式交流电压表中，大都采用整流的方法将交流信号变成直流信号，再以其平均值驱动指示器，给出有效值读数。这种方法在电子测量领域中称检波法。它具有准确度高、频带宽、灵敏度较高等优点，是目前使用比较广泛的方法。另外还有热电转换法和公式法。热电转换法是通过热电偶将交流电有效值转换成直流电压；公式法是利用有效值公式进行转换，经过模拟平方器、积分器、开平方器等转换环节来完成。

根据电压表电路组成的方式不同，模拟式电压表又可分为以下几种。

1．检波-放大式

检波-放大式电压表的电路结构如图 5-3 所示。将被测电压 u_x 先变成直流电压，再经直流放大器放大，然后驱动直流微安表指针偏转。

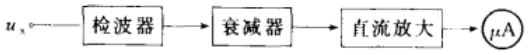


图 5-3　检波-放大式电压表方框图

电压表的频带宽度主要取决于检波电路的频率响应。通常所称“高频电压表”或“超高频电压表”都属于这一类。由于二极管导通时有一定的起始电压，且采用普通直流放大器会有零点漂移，故其灵敏度不高，不适宜测量小信号。

在高频电压测量中，由于检波后所得到的直流电压很小，为避免直流放大过程中零点漂移的影响，可应用调制型放大器。利用调制器（斩波器）将直流变换为低频交流电压进行选频放大后再解调，将交流电压再次变换为直流电压进行测量。这种电压表又称调制式电压表。

2．放大-检波式

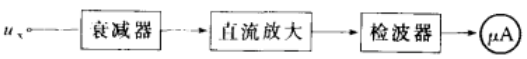


图 5-4　放大-检波式电压表方框图

放大-检波式电压表方框图见图 5-4。被测电压先经宽带放大器放大，然后再检波，变成直流电信号，驱动微安表指针偏转。这种电压表灵敏度由于先行放大而提高，但受放大器内部噪声的限制；其频率范围主要受放大器带宽的限制，典型的频率范围为 20 Hz～10 MHz，称“视频毫伏表”。

3．外差式

前面所讨论的检波-放大式和放大-检波式两种电压表，频率响应和灵敏度互相矛盾，很难兼顾，这可以通过外差测量方法来解决。外差式电压表的电路结构图如图 5-5 所示，其原理与外差式收音机相似。被测信号通过输入电路（包括输入衰减器及高频放大器）在混频器中与本机振荡器的振荡信号混频，输出的中频信号经中频放大器选频放大，然后检波，驱动微安表指针偏转。

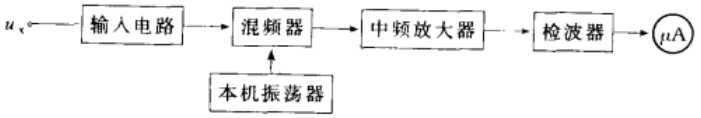


图 5-5　外差式电压表方框图

外差测量法的中频是固定不变的，中频放大器有良好的选择性，相当高的增益，这样就解决了放大器的带宽与增益的矛盾，削弱噪声的影响，提高了测量灵敏度，扩展了频率范围。一般的高频微伏表即属于这一类。

在模拟式交流电压表中，检波器是其核心。交流电压有三种表征值：峰值、平均值与有效值。根据其输出直流信号（电压或电流）与被测电压的哪种表征值成比例，将检波器分为峰值响应、平均值响应和有效值响应三种检波器。用三种不同检波器组成的电压表，也分别称峰值电压表、均值电压表及有效值电压表。

二、均值电压表

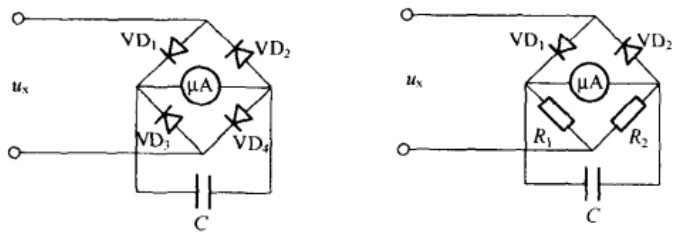
在均值电压表内，电压的平均值指被测电压经整流后的平均值，这通常是就全波整流而言，即输入电压的绝对值在一个周期的平均值。

$$\overline{U} = \frac{1}{T}\int_0^T |u(t)|\,\mathrm{d}t \tag{5-6}$$

均值电压表一般采用放大-检波式电路组成低频电压表，或采用外差式电路组成高频微伏表。

1. 检波器电路

电子电压表内常用的均值检波器电路如图 5-6 所示，图 5-6（a）为全桥式电路，图 5-6（b）中使用了两只电阻代替图 5-6（a）中的两只二极管，称半桥式电路。



(a) 全桥式电路　　(b) 半桥式电路

图 5-6　均值检波器原理图

均值响应检波器输出平均电流 $\overline{I}_{out}$ 正比于输入电压的平均值。由于电流表动圈转动的惯性，其指针将指示 $\overline{I}_{out}$ 的值。为了使指针稳定，在表头两端跨接滤波电容，滤去检波器输出电流中的交流成分。

2. 定度系数和波形换算

考虑到正弦波是最基本的和应用最普通的波形以及有效值的实际意义，几乎所有的交流电压表都是按照正弦波电压有效值定度的。显然，如果检波器不是有效值响应，则标称值（即示值 U_a）与实际响应值之间存在一个系数，此系数即为定度系数，记作 K_a。

对于均值响应检波器，在额定频率下加正弦波电压时的示值

$$U_a = K_a\overline{U} \tag{5-7}$$

所以

$$K_a = \frac{U_a}{\overline{U}} = 1.11 \tag{5-8}$$

由此可知，如果用均值电压表测量纯正弦波电压，其示值 U_a 就是被测电压正弦波的有效值。如果被测电压是非正弦波电压时，其示值并无直接的物理意义，只有把示值经过换算后，才能得到被测电压的有效值。

首先按“平均值相等示值也相等”的原则将示值 U_α 折算成被测电压的平均值

$$\overline{U}=\frac{U_\alpha}{K_\alpha}\approx 0.9U_\alpha \tag{5-9}$$

再用波形因数 K_f（如果被测电压的波形已知）求出被测电压的有效值

$$U_x=K_f\overline{U}\approx 0.9K_fU_\alpha \tag{5-10}$$

综上所述，波形换算的方法是：当测量任意波形电压时，将测量结果（即表盘上的示值）先除以定度系数折算成被测电压的平均值，再乘以被测电压的波形因数（如果被测电压的波形已知）即可得到被测的非正弦电压有效值。

对于采用全波检波电路的电压表来说

$$U_x\approx 0.9K_fU_\alpha \tag{5-11}$$

【例 5-1】 用全波式均值电压表分别测量方波及三角波电压，示值均为 1 V，问被测电压的有效值分别为多少？

解 示值 $U_\alpha=1$ V

（1）对于方波（$K_f=1$）

$$U_x\approx 0.9K_fU_\alpha=0.9\text{ V}$$

（2）对于三角波$\left(K_f=\frac{2}{\sqrt{3}}\right)$

$$U_x\approx 0.9K_fU_\alpha=\frac{2}{\sqrt{3}}\times 0.9\times 1=1.035\text{ V}$$

3．误差分析

均值电压表误差的主要来源有：指示电流表的误差、检波二极管的不稳定性、被测电压超过频率范围及波形所造成的误差。这里着重分析波形误差。

以全波均值表为例，当以示值 U_α 作为被测电压的有效值 U_x 时所引起的绝对误差为

$$\Delta U=U_\alpha-0.9K_fU_\alpha=(1-0.9K_f)U_\alpha$$

示值相对误差 γ_u 为

$$\gamma_u=\frac{(1-0.9K_f)U_\alpha}{U_\alpha}=1-0.9K_f \tag{5-12}$$

当被测电压为方波时（$K_f=1$），

$$\gamma_u=1-0.9K_f=10\%$$

即产生 +10% 的误差。

当被测电压是三角波时$\left(K_f=2/\sqrt{3}=1.15\right)$，

$$\gamma_u=1-0.9K_f=1-0.9\times 1.15\approx -3.5\%$$

即产生 −3.5% 的误差。

由上述可见，对于不同的波形，所产生的误差大小和方向是不同的。不过，如果知道检波器的类型及被测电压的波形因数，进行换算也是很方便的。

三、有效值电压表

1．检波式有效值电压表

电压有效值的定义是

$$U = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2(t)\mathrm{d}t} \tag{5-13}$$

如果通过检波器来实现，就要求这种检波器具有平方律关系的伏安特性。图 5-7 给出一种基本电路形式。图 5-7（a）利用二极管正向特性曲线的起始部分，得到近似平方关系。选择合适的偏压 E_0（大于被测电压 u_x 的峰值），可得到图 5-7（b）所示波形图。

设检波二极管 VD 的检波系数为 k，则流过它的电流

$$i = k[E_0 + u_x(t)]^2 \tag{5-14}$$

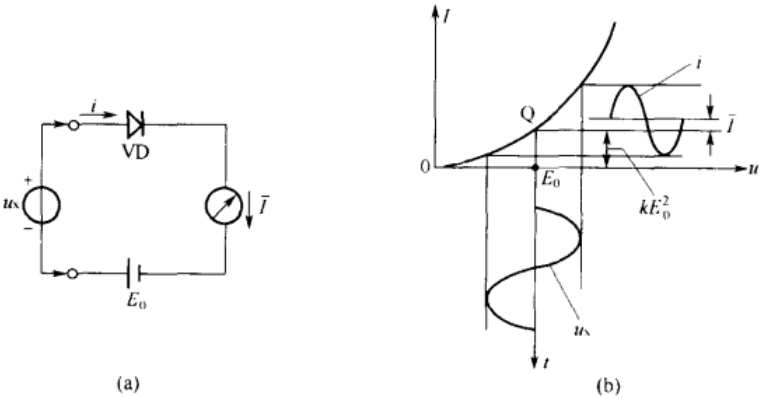


图 5-7　平方律特性的获得

直流电流表指针的偏转角与电流 I 的平均值 $\bar{I}$ 成正比

$$\bar{I} = \frac{1}{T}\int_0^T i(t)\mathrm{d}t = \frac{1}{T}\int_0^T k[E_0 + u_x(t)]^2\mathrm{d}t = kE_0^2 + 2kE_0\overline{U}_x + kU_x^2 \tag{5-15}$$

式中　kE_0^2——静态工作点电流，即无信号输入时的起始电流；

$\overline{U}_x$——被测电压的平均值，对于正弦波或周期性对称的电压 $\overline{U}_x = 0$；

kU_x^2——与被测电压有效值平方成比例的电流平均值（$\bar{I}$）。

先设法在电路中抵消起始电流，则送到直流电流表电流为

$$\bar{I} = kU_x^2 \tag{5-16}$$

从而实现了有效值转换。

用这种有效值响应检波器所构成的有效值电压表，在理论上可以测量任意周期性波形电压的有效值，不会产生波形误差。但当用正弦波电压有效值刻度时，表盘刻度是非线性的，因为 $\bar{I}$ 和 U_x 的平方成正比。

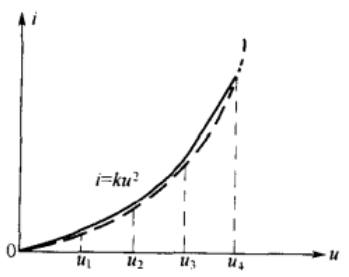


图 5-8　分段逼近式平方律曲线

一般来说，要想用这种方法获得具有理想平方律特性是困难的，二极管的正向特性曲线只有起始部分一小段接近平方律特性，动态范围很窄。如采用分段逼近法可得到动态范围较宽的接近理想的平方律特性，但必须用较多的元件，电路较复杂，其 i-u 特性曲线如图 5-8 所示。

2．热电转换式有效值电压表

热电转换式电压表是实现有效值电压测量的一种 重要方法。它利用具有热电变换功能的热电偶来实现有效值变换。

图 5-9 是热电转换电压表的示意图。图中，AB 为不易熔化的金属丝，称加热丝；M 为热电偶，它由两种不同材料的导体连接而成，其交界面与加热丝耦合，故称“热端”，而 D、E 为“冷端”。当加入被测电压 u_x 时，热电偶的热端 C 点温度将高于冷端 D、E，产生热电动势，故有直流电流流过微安表。该电流正比于热电势。因为热端温度正比于被测电压有效值 U_x 的平方，热电势正比于热、冷端的温度差，因而通过电流表的电流 I 将正比于 U_x^2。这就完成了被测交流电压有效值到热电偶电路中直流电流之间的变换，从广义来讲，也就完成了有效值检波。

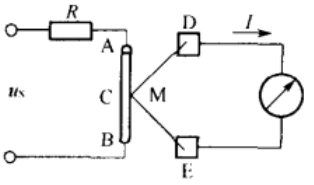


图 5-9　热电转换原理

图 5-10 是 DA-24 型有效值电压表简化组成方框图，它采用热电偶作为 AC/DC 变换元件。其中 M_1 为测量热电偶，M_2 为平衡热电偶。

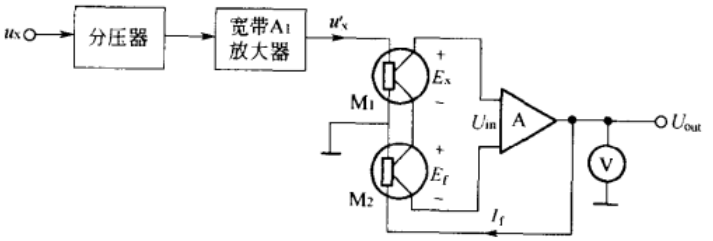


图 5-10　热电式有效值电压表原理框图

被测电压 $u_x(t)$ 经宽带放大器放大后加到测量热电偶 M_1 的加热丝上，经热电变换得热电动势 E_x，它正比于被测电压有效值 U_x 的平方，即

$$E_x = K(A_1 U_x)^2$$

式中　A_1——宽带放大器电压放大倍数；

K——热电偶转换系数。

平衡热电偶 M_2 与 M_1 的性能相同，其作用有二：一使表头刻度线性化，二是提高热稳定性。在被测电压经放大后加到 M_1 的同时，经直流放大器放大后的输出电压也加到平衡热电偶 M_2 上，产生热电动势 $E_f = KU_{out}$。当直流放大器的增益足够高且电路达到平衡时，其输入电压 $U_{in} = E_x - E_f \approx 0$，即 $E_x = E_f$，所以 $U_{out} = A_1 U_x$。由此可知，如两个热电偶特性相同（即 K 相同），则通过图示反馈系统，输出直流电压就正比于 $u_x(t)$ 的有效值 U_x，所以表头示值与输入呈线性关系。

这种仪表的灵敏度及频率范围取决于宽带放大器的带宽及增益，表头刻度线性，基本没有波形误差。其主要缺点是有热惯性，使用时需等指针偏转稳定后才能读数，而且过载能力差，容易烧坏，使用时应注意。

3. 计算式有效值电压表

交流电压的有效值即其方均根值。根据这一概念，利用模拟电路对信号进行平方、积分、开平方等运算即可得到测量结果。

图 5-11 是计算式转换器方框图。第一级为模拟乘法器，第二级为积分器，第三级对积分器的输出电压进行开方使输出电压大小与被测电压有效值成正比，从而得到最后测量结果。

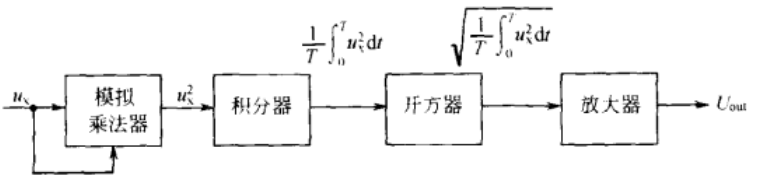


图 5-11　计算式有效值电压表方框图

第三节　数字电压表

数字电压表可缩写为 DVM。这里只讨论用于测量直流电压的 DVM。加至 DVM 的直流电压，可以是被测电压本身，也可以是被测交流电压经均值检波器转换的直流电压。

与模拟电压表相比，数字电压表有很多优点。它的量程范围宽，精度高，并以数字显示结果；测量速度快；它能向外输出数字信号，可与其他存储、记录、打印设备相连接；输入阻抗高，一般可达 10 MΩ 左右。目前数字电压表已经广泛用于电压的测量和仪表的校准。

一、DVM 的主要技术性能

1．电压测量范围

（1）量程　DVM 的量程以其基本量程（即未经衰减和放大的量程，亦即 A/D 转换器的电压范围）为基础，再和输入通道中的步进衰减器及输入放大器适当配合向两端扩展来实现。量程转换有手动和自动两种，自动转换借助于内部逻辑控制电路来实现。

（2）显示位数　DVM 的位数指完整显示位，即能显示 0～9 十个数码的那些位。因此最大显示为 *9 999* 和 *19 999* 的数字电压表都是四位数字电压表。但是为了区分起见，也常把最大显示为 19 999 的数字电压表称作位 $4\frac{1}{2}$位数字电压表。

（3）超量程能力　指 DVM 所能测量的最大电压超过量程值的能力，它是数字电压表的一个重要指标。数字式电压表有无超量程能力，要根据它的量程分挡情况及能够显示的最大数字情况决定。

显示位数全是完整位的 DVM，没有超量程能力。带有 1/2 位的数字电压表，如果按 2 V、20 V、200 V 分挡，也没有超量程能力。

带有 1/2 位并以 1 V、10 V、100 V 分挡的 DVM，才具有超量程能力。如 $5\frac{1}{2}$位的 DVM，在 10 V 量程上，最大显示 19.999 9 V 电压，允许有 100％的超量程。

如果数字电压表的最大显示为 5.999 9，称为 $4\frac{3}{4}$位。如量程按 5 V、50 V、500 V 分挡，则允许有 20％超量程。

2．分辨力

分辨力指 DVM 能够显示输入电压最小变化值的能力，即显示器末位读数跳一个单位所需的最小电压变化值。在不同的量程上，分辨力是不同的。在最小量程上，DVM 具有最高分辨力。

3．测量误差

（1）允许误差　使用条件下的误差，以绝对值形式给出。

（2）固有误差　标准条件下的误差，常以下述形式给出

$$\Delta U = \pm(\alpha\% U_x + \beta\% U_m) \tag{5-17}$$

式中　U_x——被测电压读数；

U_m——该量程的满度值；

α——误差的相对项系数；

$\alpha\% U_x$——读数误差，随被测电压而变化，与仪器各单元电路的不稳定性有关；

β——误差的固定项系数，$\beta\% U_m$ 表示满度误差；对于给定的量程，$\beta\% U_m$ 是不变的。

有时满度误差又用与之相当的末位数字的跳变个数来表示，记为 $\pm n$ 个字，即在该量程上末位跳 n 个单位时的电压值恰好等于 $\beta\% U_m$。

（3）影响误差和稳定误差　它已包括在允许误差内，有的也可能以附加误差的形式给出。

4．输入电阻和输入偏置电流

输入电阻，一般不小于 10 MΩ，高准确度的可优于 1 000 MΩ，通常在基本量程时具有最大的输入电阻。

输入偏置电流是指由于仪器内部产生的表现于输入端的电流，应尽量使该电流减小。

5．抗干扰特性

按干扰作用在仪器输入端的方式分为串模干扰和共模干扰。一般串模干扰抑制比可达 50～90 dB，共模干扰抑制比可达 80～150 dB。

6．测量速率

测量速率是在单位时间内以规定的准确度完成的最大测量次数，每秒几次或几十次不等，一般规律是测量速度越高的仪表，测量误差也大。

二、DVM 的主要类型

除了将 DVM 分成直流 DVM 和交流 DVM 外，还可以根据 A/D 变换的基本原理进行分类。

比较型 A/D 转换器是采用将输入模拟电压与离散标准电压相比较的方法，典型的是具有闭环反馈系统的逐次比较式。

积分型 A/D 转换器是一种间接转换形式。它对输入模拟电压进行积分并转换成中间量时间 T 或频率 F，再通过计数器等将中间量转换成数字量。

比较型和积分型是 A/D 转换器的基本类型。由比较型 A/D 转换器构成的 DVM 测量速度快，电路比较简单，但抗干扰能力差。积分型 A/D 转换器构成的 DVM 突出优点是抗干扰能力强，主要不足是测量速度慢。

复合型 DVM 是将积分型与比较型结合起来的一种类型。随着电子技术的发展，新的 A/D 变换原理和器件不断涌现，推动 DVM 的性能不断提高。表 5-1 列出了三类 A/D 转换器的常见形式。

下面以几种常用的典型电路为例，讨论 A/D 转换器的原理。

（一）斜坡电压式 DVM

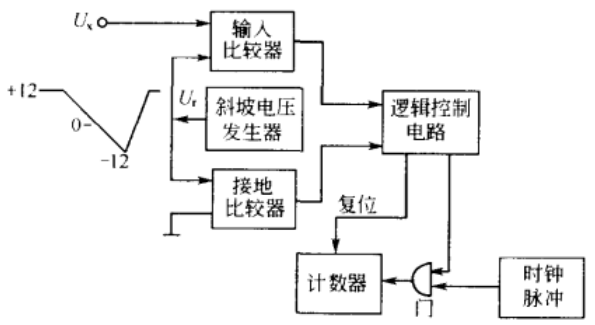
时间和频率是两个比较容易数字化的量。利用计数器，时间和频率的数字化测量是十分容易实现的。斜坡电压式 DVM 就是这样考虑的，测量的第一步是用一个线性斜坡电压将模

拟直流电压变换成容易数字化的时间间隔，而该时间间隔与被测量成正比。测量的第二步是利用计数法对这个时间间隔进行数字编码，以便把被测量用数字形式显示出来。

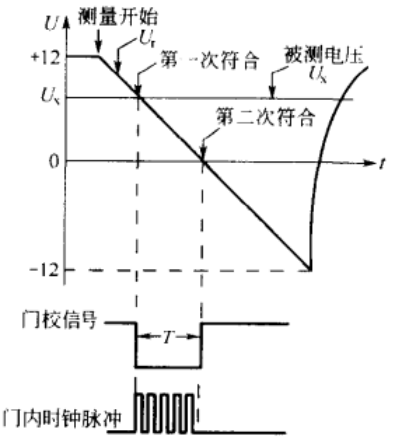
表 5-1　A/D 转换器的常见形式

比较式(直接式)	闭环反馈比较式	逐次比较、计数比较、跟踪比较、再循环剩余比较式
	开环反馈比较式	并联比较、串联比较、串并联比较式
积分式(间接式)	V/T 转换式	斜坡式、双斜积分式、三斜式、四斜式、多斜式
	V/F 转换式	电荷平衡式、复零式、交替积分式
复合式	V/T 比较式	两次取样式、三次取样式、电流扩展式
	V/F 比较式	两次取样式

斜坡电压式 DVM 简化方框图如图 5-12（a）所示，它的 A/D 变换部分实质上是一个电压-时间（V/T）变换器。斜坡电压发生器是这种 DVM 的核心部分，它产生线性十分良好的斜坡电压，斜坡电压变化范围从 + 12 V 到 − 12 V（以 DVM 的基本量程是 10.00 V 为例）。斜坡电压分别接到两个比较器：输入比较器和接地（零）比较器。输入比较器将斜坡电压与输入被测电压进行比较，当两者相等时，即测量过程发生第一次符合［见图 5-12(b)］，输入比较器的输出便改变状态。同样，在接地比较器中，当斜坡电压从 + 12 V 变化到 − 12 V 的过程中通过 0 V 时，发生第二次符合，接地比较器的输出改变状态。



(a) 斜坡电压式DVM简化方框图



(b) 斜坡电压式DVM测量原理

图 5-12　斜坡电压式 DVM 简化方框图和测量原理

上述两个比较器的输出接至逻辑控制电路，后者输出控制计数器闸门的门控制信号。若斜坡电压 U_r 是理想线性的，则门控的时间间隔 T 正比于 U_x。在闸门开通期间 T 内，时钟脉冲通过闸门进行计数。适当选择时钟脉冲频率和小数点的位置，就能以一定的位数显示出被测量。一次测量结束，逻辑控制电路输出复位信号，将计数器置零。

例如斜坡电压的斜率为 10 V/50 ms，要求四位数字读出，则时钟脉冲频率应为

$$f=\frac{1\,000\text{ 个脉冲}}{50\text{ ms}}=200\text{ kHz}$$

若被测电压 $U_x=9.163$ V，则

$$\text{门控时间 } T=\frac{9.163\text{ V}}{10\text{ V}}\times 50\text{ ms}=45.815\text{ ms}$$

$$累计脉冲计数 = 45.815\ ms \times 200\ kHz$$
$$= 9\ 163\ 个脉冲$$

通过确定小数点位置，可显示出 9.136 V。

上例说明了这种 DVM 的测量全过程。

用斜坡电压技术所能达到的测量准确度，取决于斜坡电压的线性与绝对斜率稳定性以及时间测量的准确度。此外，比较器的稳定性也是影响测量误差的重要因素。

这种 DVM 的线路简单，在要求测量准确度不太高（例如 1%）的数字多用表中还在广泛采用。

（二）逐次逼近比较式 A/D 转换器

图 5-13 是逐次比较型 DVM 原理框图，逐次比较也叫逐次逼近。这种 DVM 的核心是逐次比较式 A/D 变换器。

1．逐次比较 A/D 主要组成

逐次比较式 A/D 转换器主要由比较器、控制电路、逐次逼近寄存器 SAR、缓冲寄存器、译码器和数/模（D/A）转换器等组成。

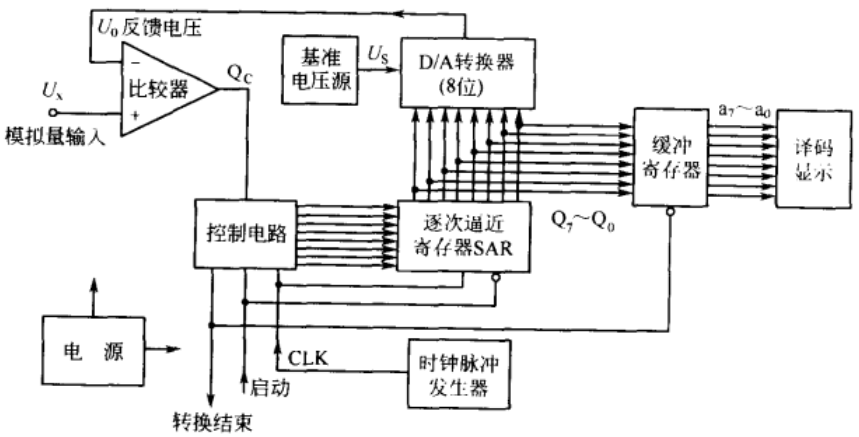


图 5-13　逐次逼近式数字电压表原理框图

比较器是一种特殊设计的高速高增益运算放大器，它完成输入端两电压的比较运算。在图 5-13 中，模拟输入电压 U_x、反馈电压 U_0 分别作用在比较器输入端，若 $U_0 > U_x$，则比较器输出 $Q_C = 0$（逻辑低电平）；若 $U_0 \leqslant U_x$，则 $Q_C = 1$（逻辑高电平）。

控制器发出一系列的节拍脉冲，并根据 Q_C 值控制 SAR 各位的输出状态。

SAR 是一组双稳触发器，如果是二进制 n 位 A/D，则 SAR 中就有 n 个双稳触发器，各位的输出由控制器控制，并送往缓冲寄存器锁存和送往 D/A 变换成模拟量 U_0。

D/A 包括基准电压源、电子开关电路和由分压分流电路组成的解码网络，其功能是将二进制数字量转换成模拟量。比如基准电压源的基准电压是 $U_S = 2.8$ V，对于 8 位 D/A，当输入数字量为 10 000 000 时，输出模拟电压为 $U_0 = (128/256) \times 2.8\ V = 1.4$ V；输入数字量为 00 000 001 时，输出模拟电压 $U_0 = (1/256) \times 2.8\ V = 10.94$ mV，可见同是二进制数码“1”，它在二进制数中的位置不同，其所代表的值也不同，不同位置上的“1”所代表的值，称为权值。

图 5-14 是权电阻 D/A 变换原理，其中 $S_0 \sim S_7$ 是电子开关，其通断对应于相应位 a_i 的

取值，若 $a_i=1$，则 S_i 通；若 $a_i=0$，则 S_i 断。运用运算放大器的分析方法，不难得出：当 S_0 闭合（对应 n 位二进制数最低位 $a_0=1$）时

$$I_0=\frac{U_S}{2^7R}=I_{min} \tag{5-18}$$

此时若 $S_1\sim S_7$ 均断开，则输出电压

$$U_0=-\frac{U_S}{2^7}=U_{0min} \tag{5-19}$$

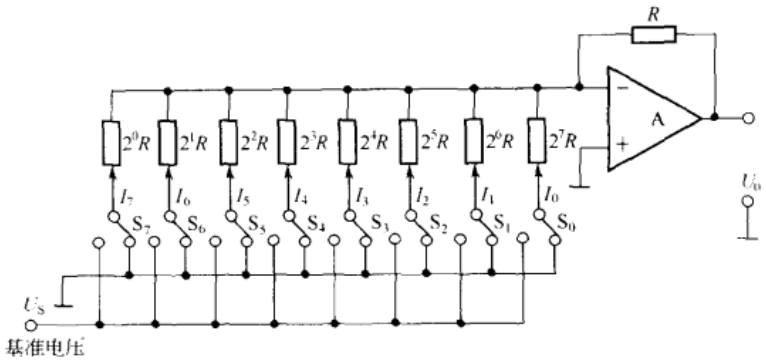


图 5-14　权电阻 D/A 变换原理图

当 D/A 输入为任意二进制数字量 $a_7a_6a_5a_4a_3a_2a_1a_0$ 时，输出电压

$$U_0=\sum_{i=0}^{7}a_i2^iU_{0min}(a_i=1\text{ 或 }a_i=0) \tag{5-20}$$

权电阻解码电路中电阻个数较少，但阻值大小不一，制造较为困难。

图 5-15（a）所示的 T 型解码电路虽然电阻个数较多，但电阻值仅为两种，很适宜集成制造工艺。左边两侧的等效电阻均为 $2R$，因此其节点电位（$a_1=1$ 时）

$$U_i=\frac{1}{3}U_S \tag{5-21}$$

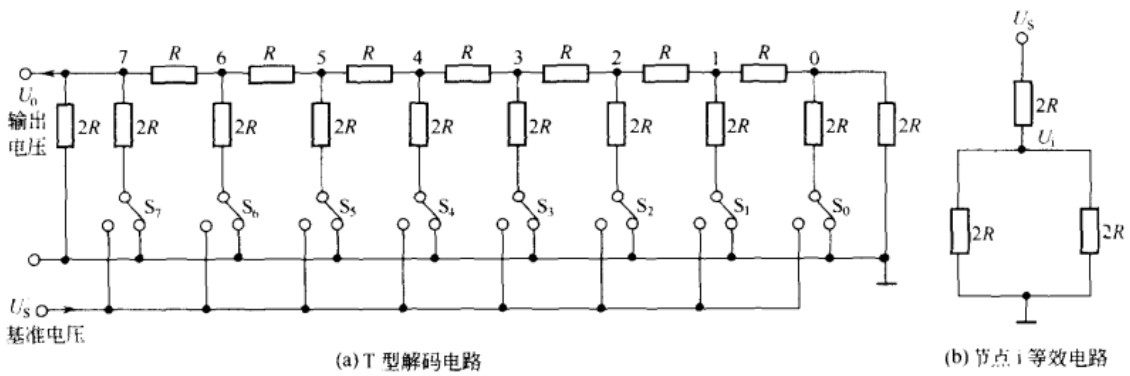


图 5-15　T 型电路 D/A 变换原理图

当该节点电位传送到输出端时，要经过多节电阻网络衰减，每节衰减数均为 1/2，比如“0”节点电位传送到输出时，要经过七节电阻网络衰减，所以传送到输出端的电压为

$$U_0=\frac{1}{2^7}\times\frac{1}{3}U_S=U_{0min} \tag{5-22}$$

根据叠加原理，对于任意二进制数 $a_7a_6a_5a_4a_3a_2a_1a_0$，输出电压

$$U_0 = \sum_{i=0}^{7} a_i 2^i U_{0\min}(a_i = 1 \text{ 或 } a_i = 0) \tag{5-23}$$

2．逐次比较 A/D 工作原理

逐次比较式 A/D 转换器的工作原理非常类似于天平称质量过程。天平在称物质的质量时使用一系列的砝码，根据称量过程中天平的平衡情况，逐次增加或减少砝码，使天平最终趋于平衡。逐次逼近比较式 A/D 转换器，在转换过程中用被测电压去与基准电压按指令进行比较，依次按二进制递减规律减小，从数字码的最高位开始，逐次比较到最低位，使 U_0 逐次逼近 U_x。

现以一个简单的 3 比特（3 位二进制）逐次比较过程说明其原理。设基准电压 U_s = 8 V，输入电压 U_x = 5 V，3 比特 SAR 的输出为 $Q_2Q_1Q_0$。流程图如图 5-16 所示。控制电路首先置 SAR 的输出 $Q_2Q_1Q_0 = 100$，即从高位 MSB 开始比较，100 经 D/A 转换器转换成 $U_0 = (1/2)U_s = 4$ V，加至比较器，$U_x \geqslant U_0$，比较器输出 $Q_c = 1$，使 Q_2 维持“1”（留码）。在此基础上再令 $Q_1 = 1$，即 $Q_2Q_1Q_0 = 110$，加至 D/A 转换器，使输出 $U_0 = 6$ V，因为 $U_x < U_0$，$Q_c = 0$，使得刚加上的码 $Q_1 = 1$ 改为 $Q_1 = 0$（去码）。接着再令 $Q_0 = 1$，即 $Q_2Q_1Q_0 = 101$，加至 D/A 转换器，使输出 $U_0 = 5$ V，因为 $U_x = U_0$，$Q_c = 1$，使 Q_0 维持“1”（留码）。至此，三位码都已顺序加过，转换结束，最终 SAR 的输出 $Q_2Q_1Q_0 = 101$，即为输入电压 U_x 的数字码，经缓冲寄存器输出至译码电路，显示出十进制数据 5 V。该过程可用表 5-2 所示。

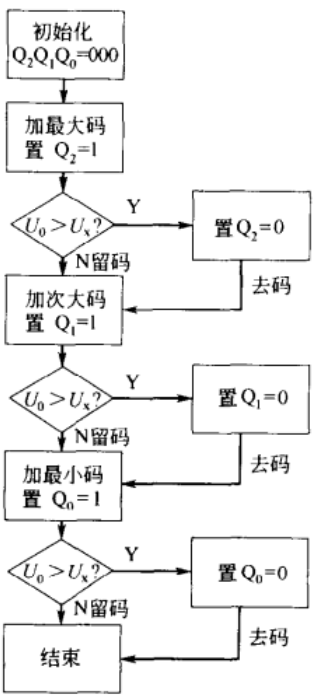


图 5-16　三位逐次比较流程图

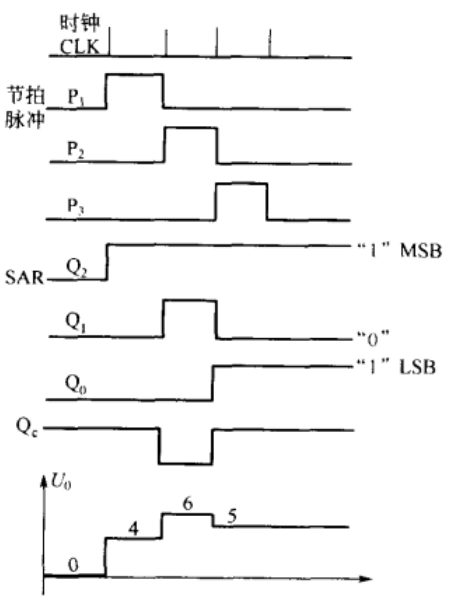


图 5-17　3 比特逐次比较 A/D 工作波型图

上述过程是在控制电路依次发出的节拍脉冲的作用下完成的，工作波形图如图 5-17 所示。

现在，A/D 转换器一般都是用大规模集成电路制作的，如 ADC0809、ADC0816、

ADC7574 等都是 8 位（二进制）逐次逼近式A/D转换器，ADC1210 是 12 位逐次逼近式A/D转换器。

表 5-2　三位逐次比较过程（$U_s=8$ V，$U_x=5$ V）

比较顺序	前次保留码	本次增加码	合　并　码	D/A 输出 U_0	比较器输出 Q_c	去留判断
1(MSB)	000	100	100	4 V	$1(U_x \geqslant U_0)$	留码
2	100	010	110	6 V	$0(U_x < U_0)$	去码
3(LSB)	100	001	101	5 V	$1(U_x \geqslant U_0)$	留码

（三）双斜积分式 A/D 转换器

双斜积分式 A/D 转换器在一个测量周期内用同一个积分器进行两次积分，积分对象分别是被测电压 U_x 和基准电压 U_r，先对 U_x 定时积分，再对 U_r 定值积分。通过两次积分的比较，将 U_x 变换成与之成正比的时间间隔。故这种 A/D 转换属 U/T 转换。

双斜积分式 A/D 转换器的原理方框图如图 5-18（a）所示，图 5-18（b）是其积分器的输出波形图。其工作过程可分三个阶段进行分析。

（1）准备阶段（$t_0 \sim t_1$）　由逻辑控制电路将电子开关中的 S_4 闭合，使积分器的输入接地；S_5 闭合，使积分电容短路，故积分器输出电压 $u_{out}=0$，此为初始状态，对应图 5-18（b）中的 $t_0 \sim t_1$ 区间。

（2）采样阶段（$t_1 \sim t_2$）　设被测电压 $-U_x<0$。在 t_1 时刻，逻辑控制电路将电子开关 S_4 断开，S_1 闭合，接入 $-U_x$，S_5 断开，积分器作正向积分，输出电压 u_{out} 从零开始线性增加。逻辑控制电路同时打开闸门，计数器对时钟脉冲计数。经过预置时间 T_1，即在 t_2 时刻，计数器溢出，复零，进位脉冲使逻辑控制电路将 S_1 断开，S_2 闭合，采样阶段结束。此时，积分器输出电压为

$$U_{outm} = -\frac{1}{RC}\int_{t_1}^{t_2}(-U_x)\mathrm{d}t = \frac{T_1}{RC}\overline{U}_x \tag{5-24}$$

如 U_x 为直流电压，则

$$U_{outm} = \frac{T_1}{RC}U_x \tag{5-25}$$

积分器对（$-U_x$）作定时积分时的输出电压 u_{out1} 的斜率由 U_x 决定，U_x 大则斜率高，U_{outm} 值高。

（3）比较阶段（$t_2 \sim t_3$）　自 t_2 时刻起，开始比较阶段。此时正极性的基准电压 U_r 接至积分器的输入端，开始定值反向积分，输出电压 u_{out2} 从 U_{outm} 开始线性下降；同时，计数器重新从零开始计数。

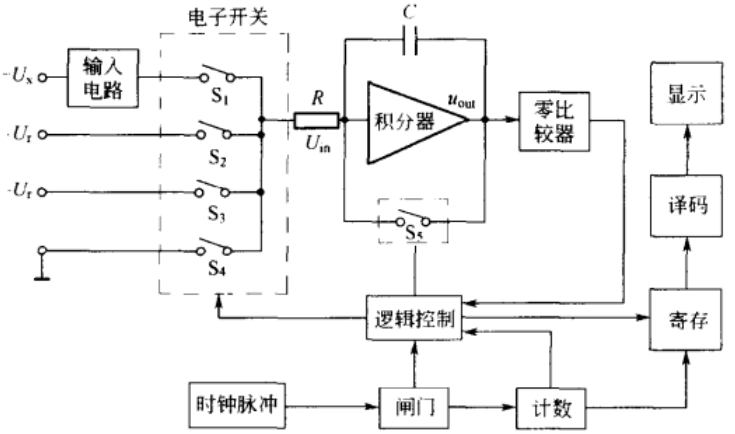
到 $t=t_3$ 时刻，积分器输出 $U_{out2}=0$，逻辑控制电路发出控制信号，S_2 断开，S_4 和 S_5 闭合，积分器恢复到零状态；同时关闭闸门，计数器停止计数，译码显示。转换器随着进入休止阶段（$t_3 \sim t_4$），做下一个测量周期的准备，自动转入第二个测量周期。

$t_2 \sim t_3$ 之间的间隔为 T_2，在 T_2 期间 u_{out2} 下降的斜率是常数。在此期间

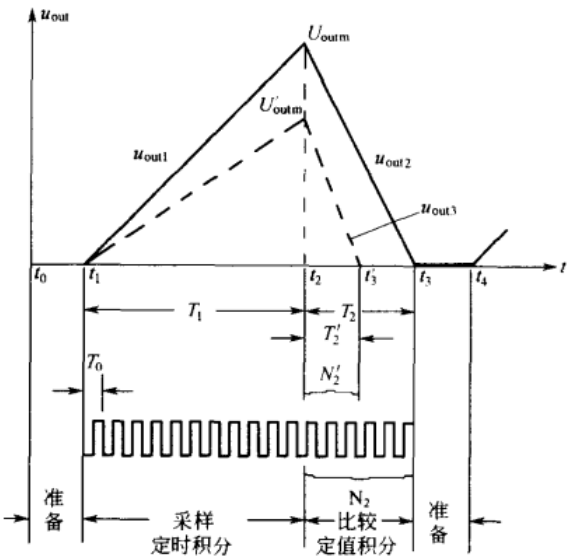
$$u_{out2} = U_{outm} + \left(-\frac{1}{RC}\int_{t_2}^{t_3}U_r\mathrm{d}t\right)$$

在 t_3 时刻

$$u_{out2}=0=U_{outm}-\frac{T_2}{RC}U_r \tag{5-26}$$



(a) 双斜积分式A/D转换器的原理方框图



(b) 双斜积分式A/D转换器的输出波形图

图 5-18　双斜积分式 A/D 转换的工作原理

由式（5-25）和式（5-26）可得到

$$\frac{T_2}{RC}U_r=\frac{T_1}{RC}U_x$$

$$U_x=\frac{U_r}{T_1}T_2 \tag{5-27}$$

式中，U_r、T_1 均为固定值。所以被测电压 U_x 正比于时间间隔 T_2。

若在时间 T_1 内计数器计数结果为 N_1，T_2 计数结果为 N_2，则

$$U_x=\frac{U_r}{N_1}N_2 \tag{5-28}$$

如果参数选取合适，被测电压 U_x 就等于在 T_2 期间计数器所计的时钟个数，即

$$U_x = N_2 \text{（电压单位）}$$

由此可见，这种 A/D 转换器的工作过程是：在同一个测量周期内，首先对被测直流电压 U_x 在限定时间（T_1）内进行定时积分，然后切换积分器的输入电压为基准电压 $-U_x<0$ 时，$U_r>0$；$-U_x>0$ 时，$U_r<0$，再对 U_r 进行定值反向积分，直到积分器输出电压等于零为止。合理选择电路参数可把被测电压 U_x 变换成反向积分的时间间隔，再利用脉冲计数法对此时间间隔进行数字编码，从而得出被测电压数值。整个过程是两次积分，将被测电压模拟量 U_x 变成与之正比的计数脉冲个数，从而完成 A/D 转换。

这种 A/D 转换器的准确度主要取决于标准电压的准确度和稳定度，而与积分器的参数（R、C 等）基本无关，因而准确度高。这是双斜积分式A/D 转换器的重要特点。由于两次积分都是对同一时钟脉冲源输出脉冲进行计数，故对脉冲频率准确度要求不高，这是这种 A/D 转换器的又一优点。

由于测量结果所反映的是被测电压在采样期间 T_1 内的平均值，故串入被测电压信号中的各种干扰成分将通过积分过程而减弱。如选择取样时间为交流电源周期（20 ms）的整数倍，则使电源干扰平均值近于零，故这种 A/D 转换器的抗干扰能力强，但转换速度较低。

第四节　数字多用表

与普通的模拟式多用表相比，数字多用表（DMM）的测量功能较多，它不但能测量直流电压、交流电压、交流电流、直流电流和电阻等参数，而且能测量信号频率、电容器容量及电路的通断等。除以上测量功能外，还有自动校零、自动显示极性、过载指示、读数保持、显示被测量单位的符号等功能。它的基本测量方法以直流电压的测量为基础。测量时，先把其他参数变换为等效的直流电压 U，然后通过测量 U 获得所测参数的数值。

一、数字多用表的基本原理

和模拟直流电压表前端配接检波器即可构成模拟交流电压表一样，在数字直流电压表前端接相应的交流-直流转换器（AC/DC）、电流-电压转换电路（I/V）、电阻-电压转换电路（Ω/V）等，就构成了数字多用表，如图 5-19 所示。可以看出，数字式多用表的核心是数字直流电压表。由于直流数字电压表是线性化显示的仪器，因此要求其前端配接的 AC/DC、I/V、Ω/V 等变换器也必须是线性变换器，即变换器的输出与输入间成线性关系。

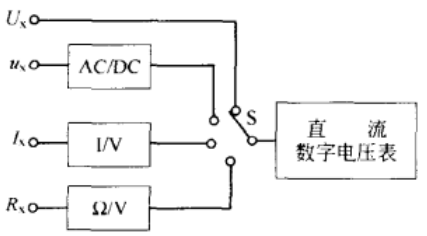


图 5-19　数字多用表组成原理图

1. 线性 AC/DC 变换器

数字多用表中的线性 AC/DC 变换器主要有平均值 AC/DC 和有效值 AC/DC。有效值 AC/DC 可以采用前面介绍的热偶变换式和模拟计算式。平均值 AC/DC 通常利用负反馈原理以克服检波二极管的非线性，从而实现线性 AC/DC 转换。图 5-20 是线性平均值检波器的原理图，其中图 5-20（a）为运算放大器构成的负反馈放大器，图 5-20（b）是半波线性检波电

路。在图 5-20（a）中，设运放的开环增益为 k，并假设其输入阻抗足够高（实际的运放一般能满足这一假设），则

$$\frac{u_o - u_i}{R_2} = \frac{u_i - u_x}{R_1} \tag{5-29}$$

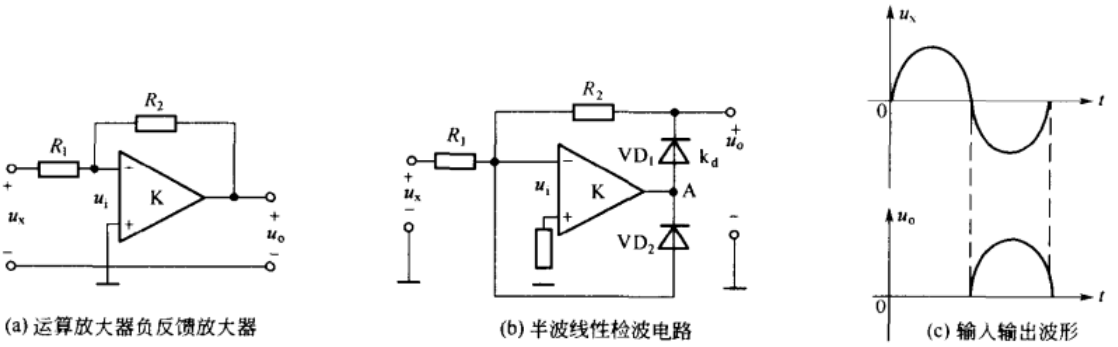
$$u_o = -ku_i \tag{5-30}$$

解得

$$u_o = -\frac{kR_2}{R_2 + (1+k)R_1}u_x \tag{5-31}$$

一般 $k \gg 1$（通常 k 在 $10^5 \sim 10^8$ 之间），因此上式简化为

$$u_o \approx -\frac{R_2}{R_1}u_x \tag{5-32}$$



(a) 运算放大器负反馈放大器　(b) 半波线性检波电路　(c) 输入输出波形

图 5-20　线性检波原理图

即由于反馈电阻 R_2 的负反馈作用，放大器的输出和输入间成线性关系，而与运放的开环增益无关。基于上述原理，分析图 5-20（b）电路的特性：在 u_x 负半周，A 点电压 u_A 为正值，VD_1 导通，设 VD_1 检波增益为 k_d，则 $u_o/u_i = -kk_d$，由于 k 值很大，因而 kk_d 值也很大，引入图 5-20（a）分析结论，此负半周 u_o 输出满足式（5-32），而与 k_d 变化基本无关，这就大大削弱了 VD_1 伏安特性的非线性失真，而使输出 u_o 线性正比于被测电压 u_x。在 u_x 正半周，u_A 为负值，VD_2 导通，VD_1 截止，考虑运放的“虚短路”和“虚断路”特性，u_o 被箝位在 0 伏。这样，图 5-20（b）就构成了线性半波检波器，输入输出波形如图 5-20（c）所示。为了提高检波器灵敏度，图 5-20（b）也可使用全波检波电路。在实际数字电压表的 AC/DC 变换器中，为了增加检波器输入阻抗，其前面加接一级同相放大器（源极跟随器、射级跟随器），输出端加接一级有源低通滤波器以滤除交流成分，获得平均值输出，从而构成了如图 5-21 所示的线性平均值 AC/DC 变换器结构。

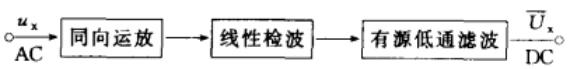


图 5-21　线性平均值 AC/DC 框图

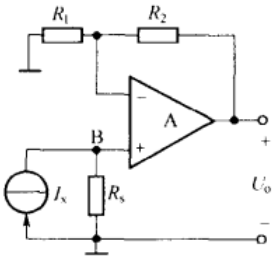
2. I/V 变换器

将直流电流 I_x 变换成直流电压最简单的方法，是让该电流流过标准电阻 R_s，根据欧姆定律，R_s 上的端电压 $U_{Rs} = R_s I_x$，从而完成了 I/V 线性转换。为了减小对被测电路的影响，电阻 R_s 的取值应尽可能小，图 5-22 是两种 I/V 变换器的原理图。图 5-22（a）采用高输入阻抗同相运算放大器，不难算出输出电压 U_o 与被测电流 I_x 之间满足

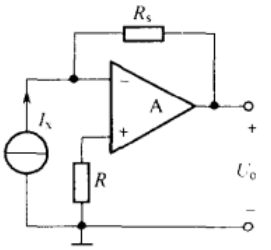
$$U_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) R_s I_x \tag{5-33}$$

当被测电流较小时（I_x 小于几个毫安），采用图 5-22（b）转换电路，忽略运放输入端漏电流，输出电压 U_o 与被测电流 I_x 间满足

$$U_o = -R_s I_x \tag{5-34}$$



(a) 同相输入变换



(b) 反相输入变换

图 5-22　I/V 变换器

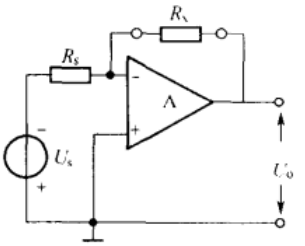


图 5-23　恒流法 Ω/V 变换器

3．Ω/V 变换器

实现 Ω/V 变换的方法有多种，图 5-23 是恒流法 Ω/V 变换器原理图。图中 R_x 为待测电阻，R_s 为标准电阻，U_s 为基准电源，该图实质上是由运算放大器构成的负反馈电路，利用前面的分析方法，可以得到

$$U_o = \frac{U_s}{R_s} R_x \tag{5-35}$$

即输出电压与被测电阻成正比，$\frac{U_s}{R_s}$实质上构成了恒流源，改变 R_s，可以改变 R_x 的量程。

二、数字多用表的基本组成

图 5-24 是某种型号数字多用表的整机方框图。全机由集成电路 ICL-7129、4 $\frac{1}{2}$位 LCD 显示器、电流-电压变换器（I/U）、电阻-电压变换器（Ω/U）、AC/DC 转换器、电容-电压变换器（C/U）、频率-电压变换器（F/U）、蜂鸣器电路、电源电路等组成。

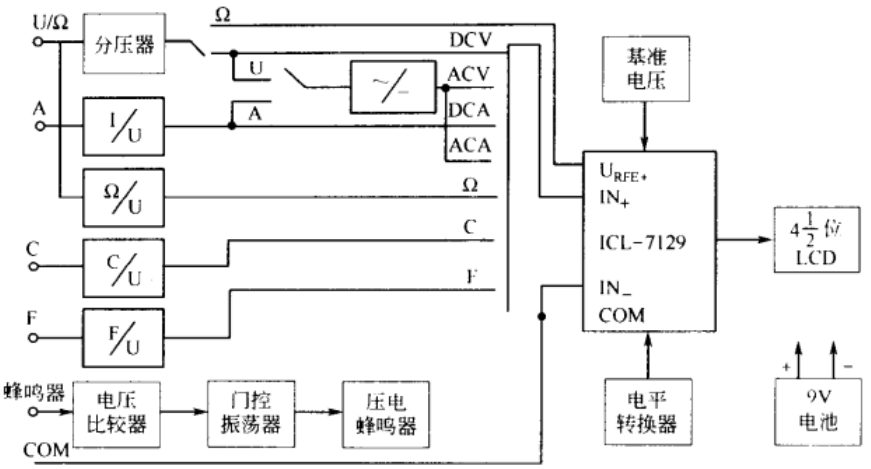
集成电路 ICL-7129 测量电路的基本部分为基本量程 200 mV 的直流数字电压表。对于电流、电阻、电容量、频率等非电压量，都必须经过变换器转换成电压量后，送入 A/D 转换器。对于高于基本量程的输入电压，还须经分压器变换到基本量程范围。

ICL-7129 型 A/D 转换器内部包括模拟电路和数字电路两大部分。模拟部分为积分式 A/D 转换器。数字部分用于产生 A/D 变换过程的控制信号及对变换后的数字信号进行计数、锁存、译码，最后送往 LCD 显示。使用 9 V 电池，电平转换器则将电源电压转换为 LCD 显示所需的电平幅值。每秒可完成 A/D 转换 1.6 次。

三、测量电路

测量电压、电流和电阻时电路连接如图 5-25 所示。

电压和电阻测量共用一个输入端。电压的基本量程为 200 mV。测量时对高于 200 mV 的被测电压，需通过分压电路变换到基本量程范围。测量电流时被测电流流过取样电阻，将



注：IN_+、IN_-为A/D转换器输入电压正负端；COM为公共端（模拟地）；U_{RFE+}为基准电压正端。

图 5-24　某数字多用表原理方框图

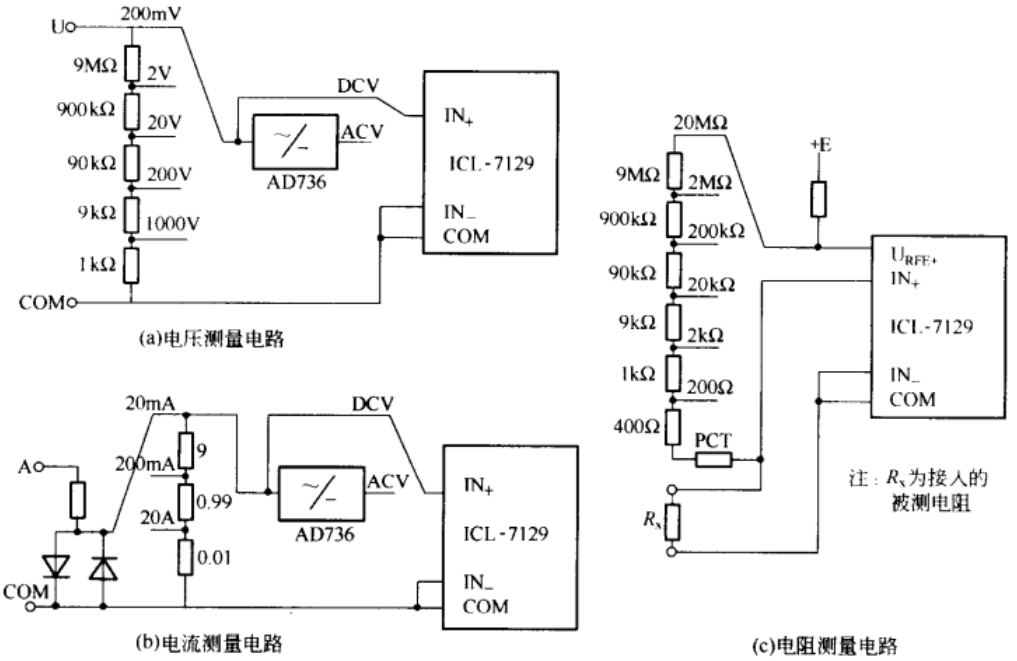


图 5-25　测量电压、电流和电阻时电路连接图

电流量转换为电压量送至A/D转换器。取样电阻的大小依量程而定，它保证在满量程电流值时，取样电压为200 mV。

测量交流电压和电流时，还须经过AC/DC变换。该仪器使用集成电路AD736作交直流转换。它是一种计算式有效值型转换器，既可用于测量正弦电压，也可用于测量方波、三角波等非正弦电压，所给结果都为有效值，不必进行换算。但是，由于交流测量电路中没有使用隔直流电容器，因此指示值为交流有效值和直流分量之和。

ICL-7129 有一量程控制端。测量电阻时仪器基本量程改为 2 V。这时 U_{REF+} 端电压为 +3.2 V。被测电阻与内部的标准电阻串联后分压，将被测电阻转换为相应的电压值进行测量。

测量电容和频率时，也需将被测量转换为相应的电压值送至 A/D 转换器。图 5-26 为测量电容时的电路连接图。图中 A_1 和周围的阻容网络组成文氏桥振荡器，A_2、A_3 为放大器。文氏桥振荡电路中，闭环增益由负反馈支路决定，略大于 3；振荡频率由正反馈支路的电阻、电容决定，频率约为 400 Hz。

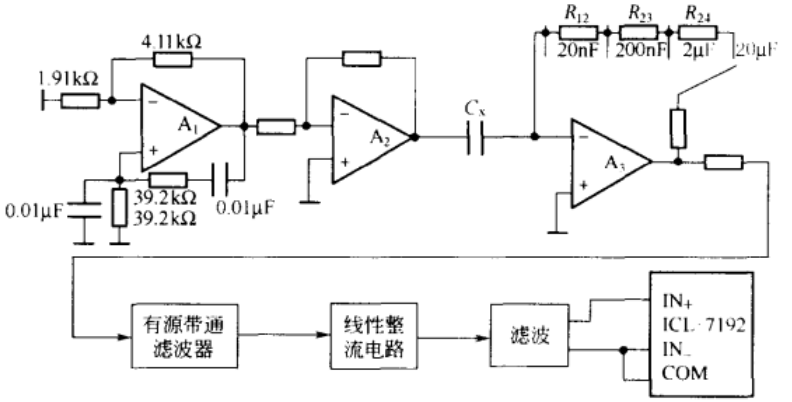


图 5-26　测量电容时电路连接图

在 A_3 放大电路中反馈支路电阻 R_{12}、R_{23}、R_{24} 为量程电阻。前级来的输入信号经被测电容 C_x 加至 A_3 的反相输入端，本级的闭环增益为

$$A_V = -\frac{R_f}{1/j\omega C_x} = -j\omega C_x R_f \tag{5-36}$$

式中，R_f 为图 5-26 中的 R_{12}、R_{23}和 R_{24}的适当组合。

可见，当 R_f 一定时，放大器的输出电压与被测电容的容量成正比。该电压经有源滤波、线性整流后，加至 ICL-7129 输入端进行测量。可直读电容的数值。

测量频率时，首先对信号进行放大、整形，然后经频率-电压变换电路，将被测频率变换为成比例的电压，再送至 ICL-7129 中测量。

仪表内装有蜂鸣器电路，可用于检查线路的通断。线路接通时使比较器翻转，门控振荡器起振，从而推动蜂鸣器发声。

四、数字多用表的特点

与模拟式多用表相比，数字多用表除具有一般 DVM 的准确度高、数字显示、读数迅速准确、分辨力高、输入阻抗高、能自动调零、自动转换量程、自动转换及显示极性等优点外，还由于采用大规模集成电路，因而体积小，可靠性好，测量功能齐全，操作简便，有些数字多用表可以精确地测量电容、电感量、温度、晶体管的 h_{FE}等，大大地扩展了功能；同时数字多用表内部有较完善的保护电路，过载能力强等等。由于数字多用表具有上述这些优点，使得它获得越来越广泛的应用。但它也有不足之处，它不能反映被测量的连续变化过程以及变化的趋势，如用来观察电容器的充、放电过程，就不如模拟电压表方便直观，也不适于做电桥调平衡用的零位指示器；同时，其价格也偏高，所以尽管数字多用表具有许多优

点，但它不可能完全取代模拟式多用表。

五、数字万用表的使用

数字万用表采用了大规模集成电路使得操作变得更为简便，读数更精确，而且还具备了较完善的过压、过流保护功能。下面以 DT-830 型数字万用表为例介绍面板结构、基本使用方法和在应用中应注意的几个问题。

（一）DT-830 型面板图

DT-830 系列包括 DT-830，DT-840，DT-845，DT-860，DT-890 等型号，均属于目前国内较为流行的 $3\frac{1}{2}$ 位袖珍式液晶显示数字万用表。DT-830 型数字万用表的面板如图 5-27 所示，该表的前后板主要包括：液晶显示器、电源开关、量程选择开关、h_{fe} 插孔、输入插孔、电池盒。

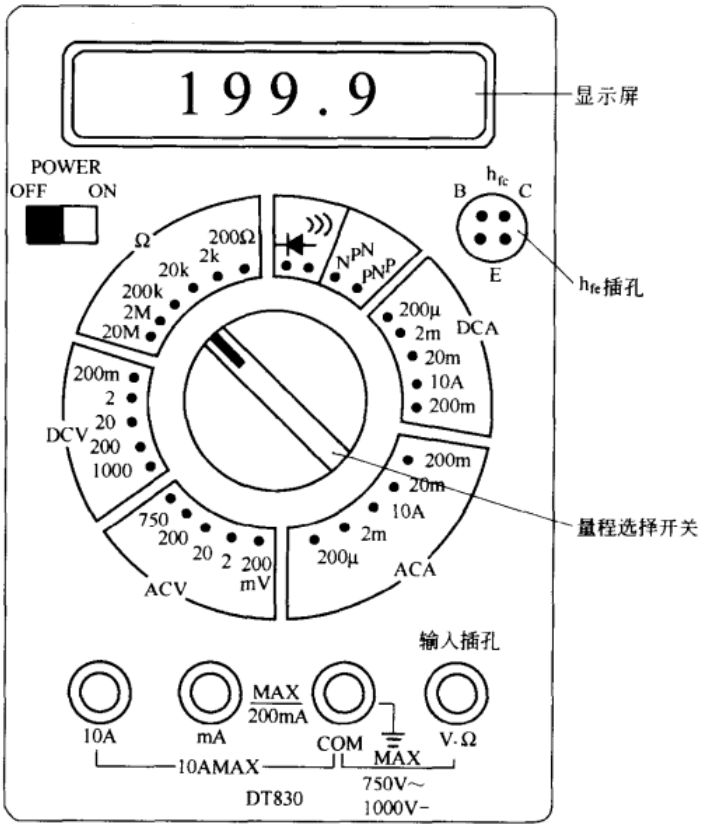


图 5-27　DT-830 型数字万用表面板图

（1）液晶显示器　采用 FE 型大字号 LCD 显示器，最大显示值为“199.9”或“-199.9”，仪表具有自动调零和自动显示极性功能。如果被测电压或者被测的电压极性为负，就在显示值前面出现负“-”。当叠层电池的电压低于 7 V 时，显示屏的左上方显示低电压指示符号。超量程时显示“1”或“-1”，视被测量电压的极性而定。小数点由量程开关进行同步控制，使小数点左移或者右移。

（2）电源开关（POWER）　把电源开关拨至“ON”接通电源，即可使用仪表；测量完毕应拨到“OFF”的位置，以免空耗电池。

（3）量程开关为6刀28掷，可同时完成测试功能和量程的选择。

（4）h_{fe}插孔　作为测试晶体三极管的专用插口，测试时，将三极管的三个管脚插入对应的E、B、C孔内即可。

（5）输入插孔　共有“10 A”，“mA”，“COM”，“V·Ω”四个插孔，注意黑表笔始终插在“COM”孔内；红表笔则根据具体测量对象插入不同的孔内。面板下方还有“10AMAX”或“MAX200 mA”和“MAX750 V～1 000 V－”标记，前者表示在对应的插孔间所测量的电流值不能超过10 A或200 mA；后者表示测交流电压不能超过750 V，测直流电压不能超过1 000 V。

（6）电池盒　电池盒位于后盖下方。在标有“OPEN”（打开）的位置，按箭头指示方向拉出活动插板，即可更换电池，为了检修方便，0.5 A快速熔丝管“FUSE”也装在电池盒内。

（二）基本使用方法

1．电压测量

将红表笔插入“V·Ω”孔内，合理选择直流或交流挡位及电压量程。一定注意把DT-830型数字万用表与被测电路并联，方可进行测量。不同的量程，测量精度也不同，不要用高量程挡去测量小电压，否则将会出现较大的误差。

2．电流测量

将红表笔插入“mA”或“10 A”插孔（根据测量值的大小），合理选择交流直流挡位和量程，再把数字万用表串联接入被测电路方可进行测量。

3．电阻测量

将红表笔插入“V·Ω”孔内，合理选择量程，即可进行测量

4．二极管的测量

将红表笔插入“V·Ω”孔内，量程开关转至标有二极管符号的位置，若二极管正常，则正向电压值为0.5～0.8 V（硅管）或者0.25～0.3 V（锗管）；当反向测量时，若管正常，将出现“1”；若损坏，将显示“000”。

5．h_{fe}值测量

根据被测管的类型（PNP或NPN）不同，把量程开关转至“PNP或NPN”处，再把被测的三极管的三脚插入相应的E、B、C孔内，此时，显示屏将显示h_{fe}值的大小。

6．电路通、断的检查

将红表笔插入“V·Ω”孔内，量程开关转至标有“·)))”符号处，让表笔触及被测电路，若内蜂鸣器出叫声，则说明电路是通的，反之则不通。

（三）使用数字万用表的注意事项

① 仪表的使用或存放应避免高温、寒冷、阳光直射、高湿度及强烈振动环境。

② 袖珍式$3\frac{1}{2}$位数字万用表的频率特性较差，例如：按规定DT-830型只能测量45～500 Hz的交流电压或交流电流。造成频率特性较差的主要原因是它的转换器的频率范围比较窄，其次是仪表的输入电容C较大。

③ 测量晶体管h_{fe}值时，DT-830型数字万用表工作电压仅为2.8 V，且未考虑V_{be}的影响，因此，测量值偏高，只能是一个近似值。

④ 在使用各电阻挡、二极管挡、断通挡时，红表笔接“V·Ω”插孔（带正电），黑表笔

接“COM”插孔，这与模拟式万用表在各电阻挡的表笔带电极性恰好相反，使用时应特别注意。此外，由于电阻挡所能提供的测试电流很小，测量二极管、三极管的正向电阻时，比用模拟式万用表电阻挡测量的数值要高几倍至十几倍，因此建议用万用表“二极管挡”改测正向电阻，以获得正确结果。

⑤ 为了延长电池的使用寿命，每次用完时应将电源拨至“OFF”位置，长期不用，要取出电池，防止电池漏出电解液而腐蚀电路板。

DT-830 采用 9 V 叠层电池供电，总电流约为 2.5 mA，整机功耗约为 17.5～25 mW，随着电池电压的下降，功耗也相应减少，一节叠层电池可连续工作 200 h，或断续使用一年左右。工作温度 0～40 ℃，环境的相对湿度 80%。

DT-830 的测量范围及准确度见表 5-3。

表 5-3　DT-830 型数字万用表的测量范围及准确度

测量项目	测量范围	测量准确度
直流电压 DCV	0.1 mV～1 000 V	±(0.5%～0.8%)+2 个字
交流电压 ACV	0.1 mV～750 V	±1.0%+5 个字
直流电流 DCA	0.1～10 A	±(1.0%～2.0%)+2 个字
交流电流 ACA	0.1～10 A	±(1.2%～2.0%)+5 个字
电阻	0.1 Ω～20 MΩ	±1.0%+2 个字～±2.0%+3 个字
分辨力	1 个字	

本　章　小　结

1．电压是基本的电参数，其他许多电参数可看做电压的派生量，电压测量方便，因此电压测量是电子测量中最基本的测量。

2．按测量结果的显示方式可将电子电压表分为模拟式和数字式两大类。

3．一个交流电压可用峰值 U_P、平均值 $\overline{U}$ 和有效值 U 表征其大小，三者之间的关系用波形因数 K_F 和波峰因数 K_P 联系。

4．交流电压表一般都以正弦交流电压有效值标度。测量非正弦波时，应根据电压表 AC/DC 转换器（检波器）类型及波形的 K_F 和 K_P 值进行波形换算，否则将带来较大的波形误差。

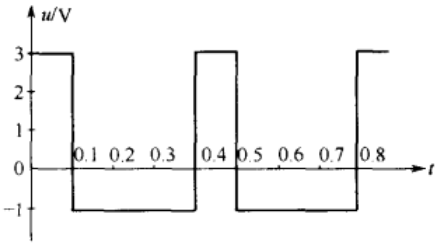
5．交流电压表最基本的结构是 AC/DC 转换器（检波器）后接直流电压表。根据其所用的检波器不同，可分为均值电压表、峰值电压表和有效值电压表。由于不同电压表的测量范围、频率宽度不同，因而各有其适用场合。

6．数字式电压表的核心是 A/D 转换器，A/D 转换器最基本的两种类型是积分型和比较型。前者抗干扰能力强，测量精度高，但测量速率低；后者测量速度快，但抗干扰能力差。总的来说，积分型特别是双斜积分式 DVM 性能较优，应用较广泛。

7．直流数字电压表 DVM 配接上 Ω/V、I/V、AC/DC 等转换器就形成数字多用表 DMM。较之模拟式多用表，数字多用表具有测量功能多、测量精度高及具有某些自动功能等优点，因而获得越来越广泛的应用。

思考题与习题

5-1　在电子电路中对电压测量有哪些基本要求？



图题 5-1

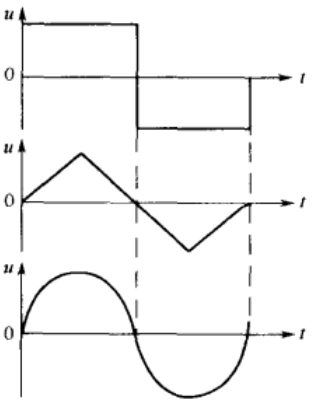
5-2 一个交流电压可用哪些参数来表征？有何相互关系？

5-3 写出图题 5-1 所示波形的全波平均值、正峰值、负峰值、峰-峰值、有效值。

5-4 用全波均值电压表对图题 5-2 所示的三种波形交流电压进行测量，读数均为 10 V。求各种波形的峰值、平均值和有效值各为多少？并将这三种波形画于同一坐标上进行比较。

5-5 利用电压测量方法自拟一个测量电路，测量一个被正弦信号调制的调幅波的调幅系数 M%。

5-6 用 8 位逐次逼近比较式 A/D 转换器转换电压。已知 U_x = 256 V、U_x = 222.5 V 和 255 V，求转换后的二进制电压值和测量的绝对误差。



图题 5-2

5-7 用一种 4 $\frac{1}{2}$ 位 DVM 的 2 V 量程测量 1.2 V 电压，已知该仪器的固有误差 $\Delta U = \pm(0.05\%\text{读数} + 0.01\%\text{满度})$，求由于固有误差产生的测量误差。它的满度误差相当于几个字？

5-8 数字电压表的固有误差 $\Delta U = \pm(0.001\%\text{读数} + 0.002\%\text{满度})$，求在 2 V 量程测量 1.8 V 和 0.18 V 时产生的绝对误差和相对误差。

5-9 某双积分型 DVM，基准电压 U_r = 6.000 V，计数脉冲频率为 f_c = 1 MHz，计数器满量程 N_1 = 80 000，求：

① 测电压 U_x = 1.500 V 时，计数器计数值 N_2 为多少？

② 取样时间 T_1 和反向积分时间（测量时间）T_2 各为多少？

5-10 下面的四种 DVM，最大读数容量分别为

① 9 999；

② 19 999；

③ 5 999；

④ 1 999；

它们各属于几位表？求第二种电压表在 0.2 V 量程的分辨力为多大？

5-11 模拟式万用表和数字式万用表都有红、黑表笔，在使用时需注意什么？

实训参考方案

数字万用表的使用

一、实训目的

熟悉数字万用表的面板布置，识别各种标志符号，掌握万用表的基本测量方法。

二、实训器材

数字万用表、直流稳压电源、电阻元件、二极管、三极管。

三、实训内容

1. 交流电压的测量

用数字万用表测量市电三次，结果填入表 5-4 中。

表 5-4 测量交流电压

次　　数	第 一 次	第 二 次	第 三 次	平 均 值
数字万用表/V				

2. 直流电压的测量

用数字万用表测量直流稳压电源输出，将测量结果填入表 5-5 中。

表 5-5　测量直流电压

稳压电源/V	1.5	5	10	15	20	25
数字万用表/V						

3．晶体管的测量

（1）二极管的测量　将数字万用表的量程转换开关转到二极管符号的位置，测量并判断二极管的好坏。

（2）三极管的测量　将数字万用表的量程转换开关转到二极管符号的位置，测量三极管的好坏，并判断是 PNP 或 NPN 管。根据被测管的类型（PNP 或 NPN）不同，把量程开关转至“PNP 或 NPN”处，再把被测的三极管的三个端子插入相应的 E、B、C 孔内，测量三极管 h_{fe}值的大小。

4．电阻的测量

将电阻元件按图 5-28 所示电路焊接好，再用数字万用表测量 A 与 B、B 与 C、C 与 D 之间的电阻值，并填入表 5-6 中。

表 5-6　电阻的测量

测量对象 / 方　式	R_{AB}	R_{BC}	R_{CD}
数字万用表			
理论计算值			

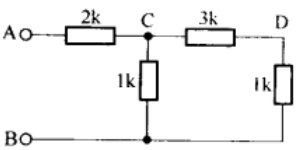


图 5-28　电阻测量电路

第六章　频域测量



目的与要求　频域测量是对信号进行频谱分析，能提供在时域测量中所不能得到的独特信息。本章要求掌握频率特性测试仪和频谱分析仪的基本工作原理及使用方法。

第一节　时域测量和频域测量的比较

观察一个电信号的普通方法是显示信号波形，即以时间 t 为水平轴，是在时间域内观察信号，称为信号的时域分析。示波器是典型的时域信号分析仪。也可以从一个电信号所包含的频率成分，即信号的频谱分布来描述，即以频率 f 作为水平轴，称为信号的频域分析或频谱分析。信号的频谱分析是很有用的，它往往能提供在时域观测中所不能得到的独特信息。频谱分析仪是频域分析的重要工具。

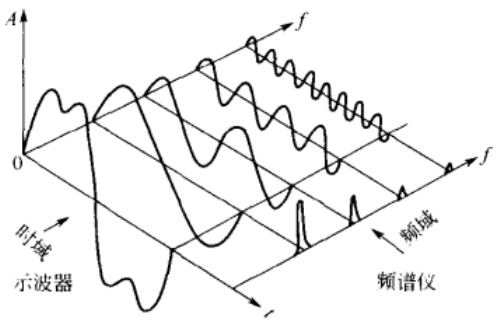


图 6-1　信号的时域和频域分析

时域和频域测量的比较可用图 6-1 来说明，图中表示基波与其二次、三次、四次谐波相加的例子，是信号 $A(t, f)$ 在幅度-时间-频率三坐标中的图像。$A(t)$ 是一个电信号随时间变化的波形图，显示这个波形并求其有关参考量是时域分析的任务。$A(f)$ 是同一个电信号随频率变化的线状频谱图，分析信号的频谱即求其各频率分量的大小是频域分析的任务。

比较 $A(t)$ 和 $A(f)$ 这两个图形，可见，时域分析和频域分析都可用来观察同一个电信号，而两者的图形是不一样的。但两者所得到的结果是可以互译的，即时域分析与频域分析之间有一定的对应关系，从数学上说就是一对傅立叶变换的关系。但是两者又是从不同角度去观察同一事物，故各自得到的结果都只能反映事物的某个侧面。因此从测量的观点来看，时域分析和频域分析各有特点。

当需要研究波形严重失真的原因时，时域测量有明显的优点。如在频谱分析仪观察到两个信号频谱图相同，但由于两个信号的基波、谐波之间的相位不同，在示波器上观察这两个信号的波形可能就不大一样。然而，频域测量也有特点，例如一个失真很小的正弦波，利用示波器观测就很难看出来，但频谱分析仪却能测出很小的谐波分量。

频率特性测试仪和频谱分析仪是重要的频域测量仪器。前者在频域内对元器件、电路或系统的特性进行动态测量，显示频率特性曲线；后者可对信号的频谱进行分析，显示信号的频谱分布图。

第二节　频率特性测试仪

在电路的设计或产品的生产、调试中，经常需要了解某个网络的频率特性（通常指幅频特性）。网络的幅频特性是指当网络的输入电压恒定时，其输出电压随频率变化的关系特性。

一、频率特性的测量方法

从测量原理上讲，网络的频率特性测量主要有点频测量法和扫频测量法两种。

1．点频测量法

点频法就是通过逐点测量一系列规定频率点上的网络增益（或衰减）来确定幅频特性曲线的方法，其原理如图 6-2 所示。正弦波信号发生器作为网络输入的信号源，提供频率和电压幅度均可调整的正弦信号；电压表Ⅰ作为网络输入端的电压幅度指示器；电压表Ⅱ作为网络输出端的电压幅度指示器。测量方法是：在被测网络整个工作频段内，改变输入信号的频率，注意在改变输入信号频率的同时，保持输入电压的幅度恒定（用电压表Ⅰ来监视），在被测网络输出端用电压表Ⅱ测出各频率点相应的输出电压，做好记录。然后在直角坐标中，以横轴表示频率的变化，以纵轴表示输出电压幅度的变化，连接各点，就描绘出网络的幅频特性曲线。

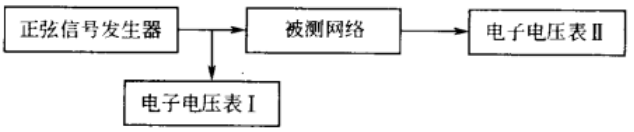


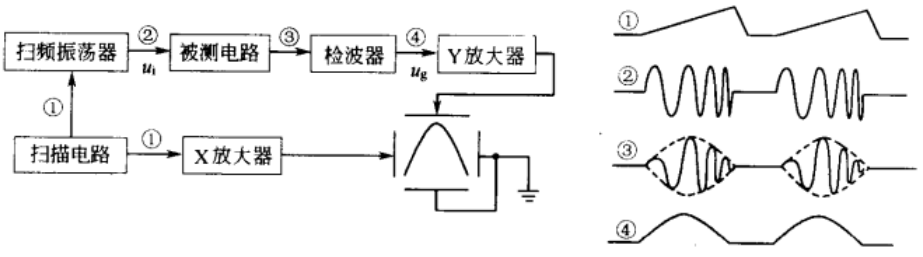
图 6-2　点频法测量幅频特性

点频法是一种静态测量法，它的测量准确度比较高，能反映出被测网络的静态特性，测量时不需要特殊仪器，是工程技术人员在没有频率特性测试仪的条件下，进行科学研究和实验的基本方法之一。这种方法的缺点是操作繁琐、工作量大、容易漏测某些细节，又不能反映出被测网络的动态特性。

2．扫频测量法

扫频测量法是在点频测量法的基础上发展起来的。它是利用一个扫频信号发生器取代了点频法中的正弦信号发生器，用示波器取代了点频法中的电压表而组成的。其工作原理如图 6-3 所示。图（a）中扫频振荡器是关键环节，它产生一个幅度恒定且频率随时间线性连续变化的信号作为被测电路的输入信号，通常称为扫频信号，如图 6-3（b）中的波形②。这个扫频信号经过被测电路后就不再是等幅的，而是幅度按照被测网络的幅频特性做相应变化，如图 6-3（b）中的波形④，这个包络线的形状就是被测电路的幅频特性。最后经过 Y 通道放大，加到示波管 Y 偏转系统。

扫描电路产生线性良好的锯齿波电压，如图 6-3（b）中的波形①。这个锯齿波电压一



(a)方框图　　(b)工作波形

图 6-3　扫频法测量幅频特性

方面加到扫频振荡器中对其振荡频率进行调制，使其输出信号的瞬时频率在一定的频率范围内由低到高作线性变化，但其幅度不变，这就是前述的扫频信号。另一方面，该锯齿波电压通过放大，加到示波管 X 偏转系统，配合 Y 偏转信号来显示图形。

示波管的水平扫描电压，同时又用于调制扫频信号发生器形成扫频信号。因此，示波管屏幕光点的水平移动，与扫频信号频率随时间的变化规律完全一致，所以水平轴也就变换成频率轴。也就是说，在屏幕上显示的图形是被测网络的幅频特性曲线。

扫频测量法简单、速度快，可以实现频率特性测量的自动化。由于扫频信号的频率变化是连续，所以不会像点频法那样由于测量的频率点不够密而遗漏某些被测特性的细节。扫频法反映的是被测网络的动态特性，这一点对某些网络的测量尤为重要，如滤波器的动态滤波特性的测量等。此外，用扫频法测量网络时，还能边测量，边调试，这显然大大的提高了调试工作效率。

扫频法的不足之处是测量的准确度比点频法低。

二、频率特性测试仪工作原理

频率特性测试仪，简称扫频仪，是利用示波管直接显示被测二端网络频率特性曲线的仪器，是描绘表征网络传递函数的仪器。它是在静态逐点测量法的基础上发展起来的一种快速、简便、实时、动态、多参数、直观的测量仪器，广泛地应用于电子工程等领域。例如，家用电器（电视机、收录机等）的测试、调整都离不开扫频仪。

扫频仪的组成如图 6-4 中的虚线框内的电路所示。而检波探头（扫频仪附件）是扫频仪外部的一个电路部件，用于直接探测被测网络的输出电压。检波探头与示波器的衰减探头外形相似（体积稍大），但电路结构和作用不同，它内藏晶体二极管，起包络检波作用。由此可见，扫频仪有一个输出端口和一个输入端口：输出端口输出等幅扫频信号，作为被测网络的输入测试信号；输入端口接收被测网络经检波后的输出信号。显然，测试时扫频仪与被测网络构成了闭合回路。

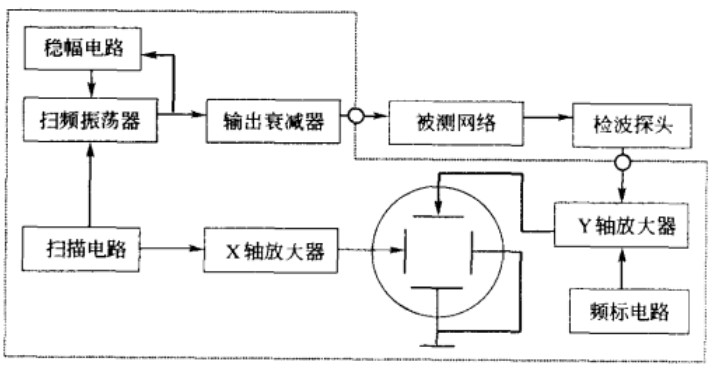


图 6-4　扫频仪的组成框图

扫描电路、扫频振荡器、稳幅电路和输出衰减器构成了扫频信号发生器。扫频信号发生器具有一般正弦信号发生器的工作特性，其输出信号的幅度和频率均可调节。此外它还具有扫频工作特性，其扫频范围（即频偏宽度）也可以调节。测量时要求扫频信号的寄生调幅尽可能小。

1．扫描电路

扫描电路用于产生扫频振荡器所需的调制信号及示波管所需的扫描信号。扫描电路的输出信号有时不是锯齿波信号，而是正弦波或三角波信号。这些信号一般是由 50Hz 市电通过降压之后获得，或由其他正弦信号经过限幅、整形、放大及积分之后得到。这样设计的目的是为了简化仪器的电路结构，降低造价。由于调制信号与扫描信号的波形相同，因此，这样设计并不会使所显示的幅频特性曲线失真。

2．扫频振荡器

扫频振荡器的作用是产生等幅的扫频信号。在目前的扫频仪中，扫频振荡器通常采用以下两种电路形式。

（1）变容二极管扫频振荡器　变容管扫频振荡器的原理如图 6-5 所示。图中，VT_1 组成电容三点式振荡电路；VD_2、VD_3 为变容管，它们与 L_1、L_2 及 VT_1 的结电容构成振荡回路；C_1 为隔直电容；L_2 为高频阻流圈。调制信号经 L_2 同时加至变容管 VD_2、VD_3 的两端，当调制电压随时间作周期性变化时，VD_2、VD_3 结电容的容量也随之变化，结果使振荡器产生扫频信号。

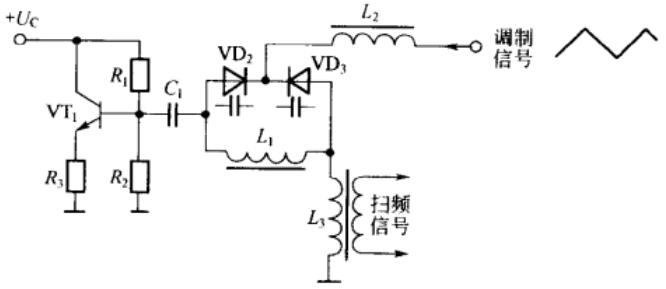


图 6-5　变容管扫频振荡器原理图

（2）磁调制扫频振荡器　所谓磁调制扫频，就是用调制电流所产生的磁场去控制振荡回路电感量，从而产生频率随调制电流变化的扫频信号。

一个带磁芯的电感线圈，其电感量 L_C 与该磁芯的有效导磁系数 μ_e 之间的关系为

$$L_C = \mu_e L \tag{6-1}$$

其中 L 是空芯线圈的变量。若能使 μ_e 随调制电压的变化而变化，那么 L_C 也将随之变化。若将一个电感量 L_C 随调制电压的变化而变化的线圈接入振荡回路，便可使振荡产生扫频信号。

图 6-6 是磁调制扫频的原理图。图中 M 为普通磁性材料，m 为高导磁率、低损耗的高频铁氧体磁芯，M 与 m 构成闭合磁路。W_1 为励磁线圈，当其通过调制电流时，将使 M 中的磁通随之变化，磁芯 m 的有效导磁系数 μ_e 也发生变化，从而导致磁芯线圈的电感量 L_C 变化。W_2 为偏磁线圈，用于在 M 及 m 中建立一个直流磁通。由于直流磁通与 m 的有效导磁系数 μ_e 有关，因此，调节 RP 可以改变 L_C 的大小，因而可以改变扫频振荡器的中心频率 f_0。

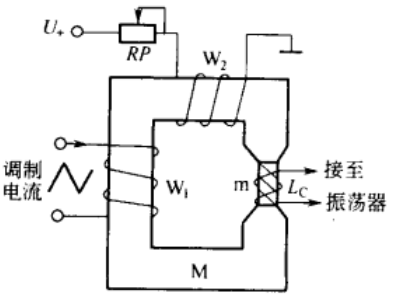


图 6-6　磁调制扫频原理图

磁调制扫频的特点是电路简单，并能在寄生调幅较小的条件下获得较大的扫频宽度。所以这种扫频方法获

得广泛应用，国产扫频仪 BT-3、BT-5、BT-8 等都采用磁调制扫频振荡器。

3. 稳幅电路

稳幅电路的作用是减少寄生调幅。扫频振荡器在产生扫频信号的过程中，都会不同程度地改变着振荡回路的 Q 值，从而使振荡幅度随调制信号的变化而变化，即产生了寄生调幅。抑制寄生调幅的方法很多，最常用的方法是：从扫频振荡器的输出信号中取出寄生调幅分量并加以放大，再反馈到扫频振荡器去控制振荡管的工作点或工作电压，使扫频信号的振幅恒定。

4. 输出衰减器

输出衰减器用于改变扫频信号的输出幅度。在扫频仪中，衰减器通常有两组：一组为粗衰减，一般是按每挡为 10 dB 或 20 dB 步进衰减；另一组为细衰减，按每挡为 1 dB 或 2 dB 步进衰减。多数扫频仪的输出衰减量可达 100 dB。

5. 频标电路

频率标志电路简称为频标电路，其作用是产生具有频率标志的图形，叠加在幅频特性曲线上，以便读出曲线上各点相应的频率值。频标的产生方法通常是差频法，其原理框图如图 6-7 所示。

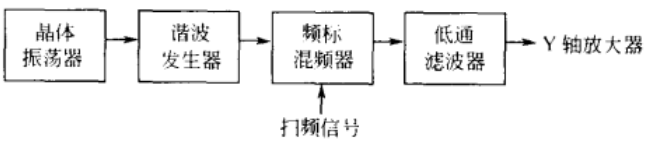


图 6-7　差频法产生频标的原理框图

晶体振荡器产生的信号经谐波发生器产生出一系列的谐波分量，这些基波和谐波分量与扫频信号一起进入频标混频器进行混频。当扫频信号的频率正好等于基波或某次谐波的频率时，混频器产生零差频（零拍）；当两者的频率相近时，混频器输出差频，差频值随扫频信号的瞬时频偏的变化而变化。差频信号经低通滤波及放大后形成菱形图形，这就是菱形频标，如图 6-8 所示。测量者利用频标可对图形的频率轴进行定量分析。

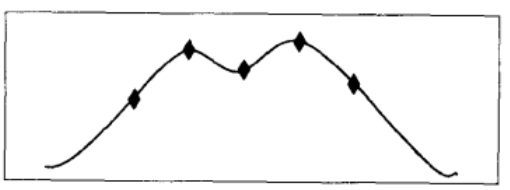


图 6-8　叠加在曲线上的频标

三、BT-3 频率特性测试仪

1. 仪器面板图（见图 6-9）

2. 主要技术指标

（1）中心频率　在 1～300 MHz 内可任意调节，分三个波段

第Ⅰ波段：1～75 MHz；

第Ⅱ波段：75～150 MHz；

第Ⅲ波段：150～300 MHz。

（2）扫频频偏　最小扫频频偏≤±0.5 MHz；

最大扫频频偏＞±7.5 MHz。

（3）寄生调幅系数　扫频频偏在±7.5 MHz 时≤±7.5%。

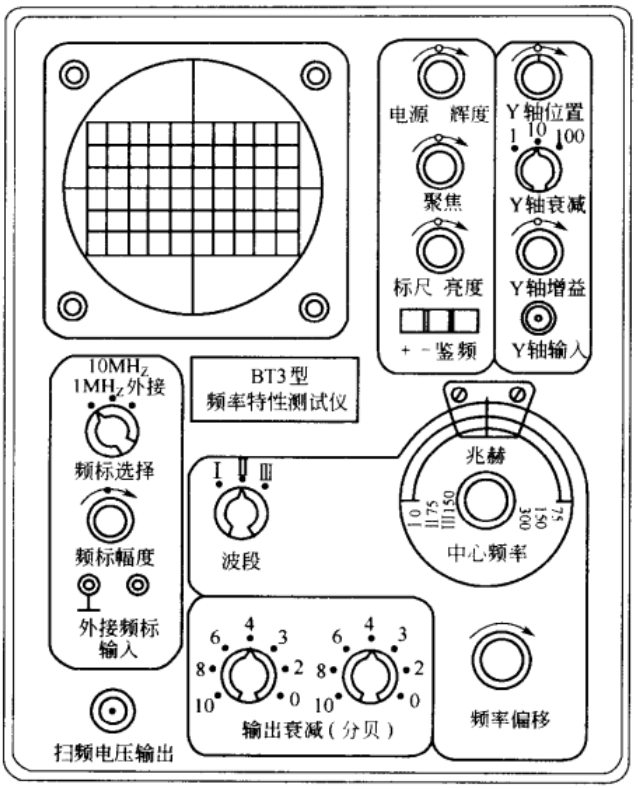


图 6-9　BT-3 面板图

(4) 调频非线性系数　扫频频偏在 ± 7.5 MHz 时≤20%。

(5) 频标　菱形，分为 1 MHz、10 MHz 和外接三种。

(6) 输出扫频信号电压　>0.1 V。

(7) 输出阻抗　75 Ω。

(8) 扫频信号输出步进衰减

粗衰减：0、10、20、30、40、50、60 dB;

细衰减：0、2、3、4、6、8、10 dB。

(9) 检波探头　输入电容≤5 pF，最大允许输入直流电压为 300 V。

3. 使用方法

(1) 频标的读法　测读频标必须先把频标选择开关置于 10 MHz 处进行粗测，然后转换频标选择至 1 MHz 进行精测。当波段开关置Ⅰ，频标选择至 10 MHz，中心频率度盘在起始位置“0”附近，屏幕中心线上应出现零频频标（该频标与其他频标相比，频标幅度和宽度明显偏大），在它右边的第一个大频标是 10 MHz 频标，第二个大频标是 20 MHz 频标，依次类推。在相邻两个大频标的中心，幅度稍低的频标是 5 MHz 频标。当波段开关至Ⅱ时，中心频率度盘从起始位置逆时针旋转时，第一个经过屏幕中心的大频标是 70 MHz 频标，第二个大频标是 80 MHz 频标，依次类推。当波段开关至Ⅲ时，中心频率度盘从起始位置逆时针旋转时，第一个经过屏幕中心的大频标是 140 MHz 频标，第二个经过屏幕中心的大频标是 150 MHz 频标，依次类推。

(2) 测量步骤　将扫频仪的扫频输出与波测网络的输入用电缆连接，用检波探头将被测

网络的输出电压检波后送入扫频仪的垂直输入，再根据被测对象选定波段、中心频率、频偏与输出衰减等，则屏幕上应显示出被测网络的频率特性曲线，调节各有关旋钮，使曲线图形便于观测。

（3）注意事项

① 扫频仪与被测网络连接时，必须考虑阻抗匹配问题。若被测网路的输入阻抗为 75 Ω，应采用终端开路的输出电缆线；若被测网络的输入阻抗很大，应采用终端接有 75 Ω 负载电阻的输出电缆线，否则应加阻抗变换器。

② 若被测网络内部带有检波器，则检波探头电缆应换成开路电缆与垂直输入连接。

③ 测量时，输出电缆和检波探头的接地线应尽量短，切忌在检波头上加接导线。

4．测量举例

下面以测量一个放大器的幅频特性为例，着重讨论如何通过观察放大器的幅频特性曲线来测量其增益和带宽。

在利用 BT-3 扫频仪正式测量前，首先要对 BT-3 的相关性能进行检查，如检查寄生调幅系数、调频非线性系数等，具体检查方法详见 BT-3 使用说明书。

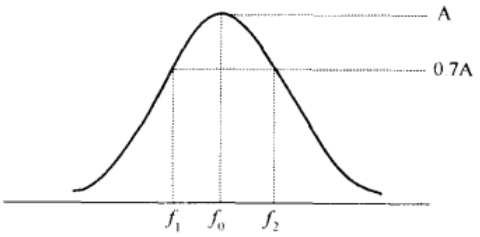


图 6-10　某放大器的幅频特性曲线

在检查的基础上，根据前述使用方法，正确连接被测放大器，并对仪器作相应调整使屏幕上显示该放大器的幅频特性曲线，如图 6-10 所示。根据显示的幅频特性曲线和仪器面板控制开关的位置可以进行定量的测量，如根据频标可以直接读出幅频特性曲线上相应点的频率值。

（1）测量增益　调节“输出衰减”旋钮，使显示的曲线幅度接近满刻度，记下此时曲线高度 H（如 5 格）及“输出衰减”量（设为 N_1）。再将检波探头与扫频输出电缆直接相连（即去掉被测放大器），此时显示的幅度显然下降，再次调节“输出衰减”（减小），使屏幕上两根水平亮线的距离仍为 H，记下此时的“输出衰减”量（设为 N_2）。这样，被测放大器的增益 K 为

$$K = N_1 - N_2 \ (\mathrm{dB})$$

应当注意，在获得 N_1 读数之后，扫频仪的“Y 轴增益”旋钮要保持不变，否则测量结果不准确。

（2）测量带宽　利用扫频仪上的频标，可以很方便地确定被测网络的幅频特性曲线的频带宽度 B。在图 6-10 中，该放大器的带宽为

$$B = f_2 - f_1$$

第三节　频谱分析仪

频谱分析仪是指一般用于显示输入信号的功率（或幅度）对频率分布的仪器，简称频谱仪。频谱仪一般用于分析重复波形的特性，因此，在所研究的频率范围内重复扫描，就可显示信号的全部成分。频谱仪主要用于研究稳态信号，即在连续信号分解成各个正弦分量并以 f/V 图形显示出来，它实质上是一台被校准于正弦波有效值的峰值响应的选频电压表。

频谱仪是一种比较复杂的仪器，有大约 15～50 个左右的指标参数及相应的控制装置。

幅度和频率都以绝对值定标的频谱仪，可对电信号和电路的频率、电平、调制度、调制失真、频偏、互调失真、带宽、窄带噪声、增益、衰减等多种参数进行测量，配接天线可测量场强、干扰。由于频谱仪的测量功能较多，因此被广泛应用于广播、电视、通信、雷达、导航、电子对抗及各种电路的设计、制造和电子设备的维护、修理等方面。

一、分类

频谱仪按不同的特性，有不同的分类方法。

按工作频率分：有低频频谱仪，射频频谱仪及微波频谱仪。

按频带宽度分：有宽带频谱仪和窄带频谱仪。

按扫频体制分：有扫前端型和扫中频型。

按工作原理分：有实时频谱仪和扫描调谐型频谱仪。

以上最后一种是最基本，最通行的分类方法。

二、基本工作原理

1．实时频谱仪

实时频谱仪因为能同时显示规定的频率范围内的所有频率分量，而且保持了两个信号间的时间关系（相位信息），使得它不仅能分析周期信号、随机信号，而且能分析瞬时信号。实时频谱仪又主要可以分为多通道频谱仪和快速傅立叶频谱仪两类。

多通道频谱仪的原理见图 6-11，输入信号是同时送到每个带通滤波器的。带通滤波器的输出表示输入信号中被该滤波器通带内所允许通过的那一部分能量，因此显示器上显示的是各带通滤波器通带内的信号的合成信号。由于受滤波器数量及带宽的限制，这类频谱仪主要工作在音频范围。缺点是造价高，体积大。

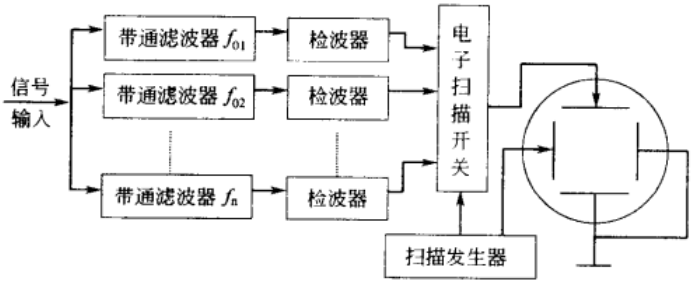


图 6-11　多通道频谱仪简化方框图

快速傅里叶频谱仪的工作原理见图 6-12，其核心是以函数进行傅立叶变换的数学计算为基础的计算机分析，因此需要使用高速计算机进行数字功率谱的计算。根据采样定理：最低采样速率应该大于或等于被采样信号的最高频率分量的两倍。傅立叶频谱仪的工作频段一般在低频范围内。如 HP3562A 的分析频带为 64 μHz～100 kHz，RE-201 的频率范围为 20 Hz～25 kHz。

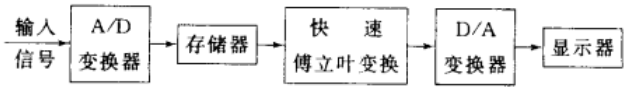


图 6-12　快速傅里叶频谱仪简化方框图

2．扫描调谐频谱仪

扫描调谐频谱仪对输入信号按时间顺序进行扫描调谐，因此只能分析在规定时间内频谱几乎不变化的周期重复信号。这种频谱仪有很宽的工作频率范围：DC 可达几十兆赫兹。常用的扫描调谐频谱仪又分为扫描射频调谐频谱仪和超外差频谱仪两类。

扫描射频调谐频谱仪的原理见图 6-13，利用中心频率可电调的带通滤波器来调谐和分辨输入信号。但这种类型的频谱仪分辨率、灵敏度等指标比较差，所以已开发的产品不多。

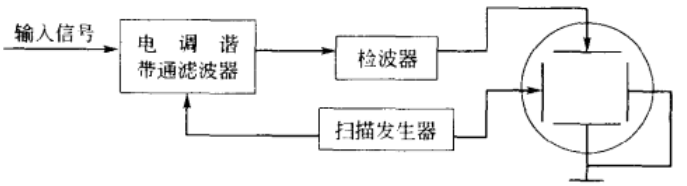


图 6-13　扫描射频调谐频谱仪简化方框图

目前产品品种和数量最多，应用最广泛的是扫描第一本振的超外差频谱仪，其原理见图 6-14。超外差频谱仪实质上是一种具有扫频和窄带宽滤波功能的超外差接收机，与其他超外差接收机原理相似，只是用扫频振荡器作为本机振荡器，中频电路有频带很窄的滤波器，按外差方式选择所需频率分量。这样，当扫频振荡器的频率在一定范围扫动时，与输入信号中的各个频率分量在混频器中产生差频（中频），使输入信号的各个频率分量依次落入窄带滤波器的通带内，被滤波器选出并经检波器加到示波器的垂直偏转系统，即光点的垂直偏转正比于该频率分量的幅值。由于示波器的水平扫描电压就是调制扫频振荡器的调制电压（由扫描发生器产生），所以水平轴已变成频率轴，这样屏幕上将显示出输入信号的频谱图。

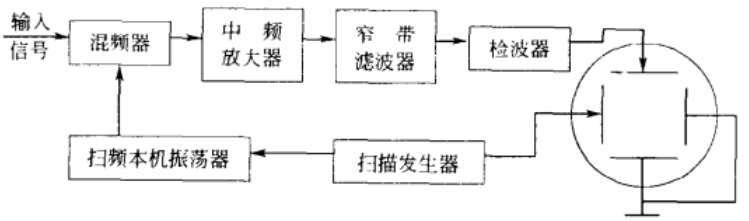


图 6-14　超外差频谱仪简化方框图

超外差频谱仪具有几 Hz～几百 GHz 的极宽的分析频率范围，从几 Hz～几 MHz 的分辨力带宽，80dB 以上的动态范围等高技术指标，如 HP8566B，国产的 BP-1、QF4021 等。

目前频谱仪的发展方向是多功能、智能化、自动化。

三、主要技术指标

1．有效频率范围（中心频率范围）

指规定仪器特性的频率范围，以 Hz 表示该范围的上限和下限。这里的频率是指中心频率，即位于显示频谱宽度中心的频率。

2．分辨力带宽

指分辨频谱中两个相邻分量之间的最小谱线间隔，单位是 Hz。它表示频谱仪能够把两个彼此靠得很近的等幅信号在规定低点处分辨开来的能力。在频谱仪屏幕上看到的被测信号

的谱线实际是一个窄带滤波器的动态幅频特性图形（类似钟形曲线），因此，分辨力取决于这个幅频特性的带宽。定义这个窄带滤波器幅频特性的 3 dB 带宽为频谱仪的分辨力带宽。

3．灵敏度

指在给定分辨力带宽、显示方式和其他影响因素下，频谱仪显示最小信号电平的能力，以 dBm、dBu、dBV、V 等单位表示。超外差频谱仪的灵敏度取决于仪器的内噪声。当测量小信号时，信号谱线是显示在噪声频谱之上的。为了易于从噪声频谱中看清楚信号谱线，一般信号电平应比内部噪声电平高 10 dB。另外，灵敏度还与扫频速度有关，扫频速度越快，动态幅频特性峰值越低，导致灵敏度越低，并产生幅值误差。

4．动态范围

指能以规定的准确度测量同时出现在输入端的两个信号电平之间的最大差值。动态范围的上限受到非线性失真的制约。频谱仪的幅值显示方式有两种：线性和对数。对数显示的优点是在有限的屏幕有效高度范围内，可获得较大的动态范围。频谱仪的动态范围一般在 60 dB 以上，有时甚至达到 100 dB 以上。

5．频谱宽度

指频谱仪显示屏幕最左和最右垂直刻度线内所能显示的响应信号的频率范围（频谱宽度）。频谱宽度通常又分三种模式。

（1）全扫频　频谱仪一次扫描它的有效频率范围。

（2）每格扫频　频谱仪一次只扫描一个规定的频率范围。用每格表示的频谱宽度可以改变。

（3）零扫频　频率宽度为零，频谱仪不扫频，变成调谐接收机。

本　章　小　结

1．时域测量和频域测量是从不同的角度去观察同一事物，故两者各有特点，互为补充，具体工作中要根据具体的测量内容来选择相应的测量方法。

2．利用扫频信号的测量是动态测量，具有直观、方便、快速、在测量的同时可以调试等优点。

3．频率特性测试仪常用于测量各种电路或系统的幅频特性，实际是示波器的一种扩展应用。扫频振荡器是测量的激励源，是仪器的核心部件。产生扫频信号的方法主要是变容二极管扫频（如 BT-4）和磁调制扫频（如 BT-3）。其基本思路是：利用扫描信号连续改变振荡回路中的电容或电感的大小，从而实现扫频。

4．BT-3 扫频仪屏幕上横坐标频率的读数，是根据叠加在显示的被测曲线上的频标来确定。

5．频谱仪主要用于分析电信号的频谱，其测量功能较多，应用广泛。目前使用最多的是超外差频谱仪。



思考题与习题

6-1　信号的时域测量和频域测量各有什么特点？两者之间有什么关系？

6-2　测量幅频特性有哪几种方法？各有什么特点？

6-3　扫频仪主要由哪几部分组成？简述各部分的功能。

6-4　产生扫频信号的方法有哪些？

6-5 使用扫频仪时，什么情况下要用检波探头？什么情况下不用检波探头？

6-6 频谱分析仪按工作原理不同可以分为哪几类？目前应用最多的是哪一类？

6-7 简述超外差频谱仪的工作原理。

6-8 试说明频谱仪采用对数放大器的必要性。

6-9 利用频谱仪可以测量哪些参数？

实训参考方案

电视机的中频通道的测试

一、实训目的

掌握扫频仪的使用方法，了解如何利用扫频仪来测量网络的幅频特性。

二、实训器材

1. BT-3 扫频仪

2. 电视机中频通道电路

三、实训内容

测量电视机的中频通道的幅频特性（双峰曲线），包括增益和带宽等。

四、注意事项

使用不带检波器的探头。

第七章　数据域测试



目的与要求　数据域测试与传统的测试方法不同，它是针对数字系统和计算机系统中“数据”信息的特征来进行测试的。本章重点要求掌握数据域测试的特点、特征分析仪的测试方法以及逻辑分析仪的构成和基本工作原理。

第一节　概　　述

随着电子技术的日益发展，特别是近年来数字集成电路和计算机技术的发展，使许多传统的测试理论、方法和技术不再能适应新的测试需求。这就使得现代测试技术中出现了一个新的测试领域——数据域测试。

模拟测量已为大家所熟悉，它包括了时域和频域测量。时域测量研究的是被测量与时间的关系，频域测量研究的是被测量与频率的关系。模拟测量的理论基础是傅里叶分析、拉普拉斯变换以及电路的基本理论。在测量仪器中，信号发生器、示波器和频谱分析仪等是它的典型应用。数据域测量的理论基础是数字电子学和逻辑代数。数字系统的故障诊断、定位和信号的逻辑分析是数据域测量的典型应用。

众所周知，大规模集成电路的内部电路是相当复杂的，外部的测试点又比较少，如何通过这些测试点去检测电路的内部工作过程；在微机系统中，硬件和软件故障应如何来查找等，这些问题是需要用测量来解决的。数据域测试仪器是指用于数字电子设备或系统的软件与硬件设计、调试、检测和维修的电子仪器。数据域测试研究的内容是在某个事件 E 中，通过一个数据字 W 的变化，来反映系统的特征 F 是正常还是有故障，这可以用一个函数式来表示，即 $F=f(W, E)$。这个数据字和事件的函数可与时域的电压和时间的函数 $F=f(v, t)$ 相类比。因此，逻辑分析仪有触发字条件，这与示波器的触发条件相类似。

通常，数字系统的测试包括两个方面：一是参数测试，例如测电压、功率、负载能力等，这可以用传统的时域、频域测量方法来解决；二是逻辑测试，数字系统的信息通常是由时间或二进制数据字组成，因而数据的测试常要进行逻辑定时关系和逻辑状态的测试。对于一个有故障的数字系统，首先要判断逻辑功能是否正常，其次要确定故障的位置，最后分析故障原因，这个工作过程称为故障诊断。要实现故障诊断，通常要在被测件的输入端加上一定的测试序列信号，然后观测整个输出序列信号，将观测到的输出序列与预期的输出序列进行比较，从而获得诊断信息。常用的简易测试工具是逻辑测试笔，但要进行较为全面与准确的测试则要用到特征分析仪和逻辑分析仪。

第二节　特征分析仪

信号的特征分析是一种对数字系统进行检测维修的简单易行的方法。数字系统设计师将正常的特征信号标注在电路板或原理图的测试点上，检测维修人员可检测这些点的数字信号，将其与正常的特征信号相比较，即可分析、判断故障。

一、特征分析法

在数据流系统中，正被传输的数据串常被称为数据流。由于这些数据携带着信息，有时也称信息流。因为数字系统的检测对象是测试点的数据流，所以需要将长的数据流进行压缩，以便于测试，在压缩的结果中必须保留数据流中的错误，这就是所谓的数字压缩技术。要实现这种有效的数据压缩常利用循环冗余校验法，即用伪随机信号发生器进行误差检验。

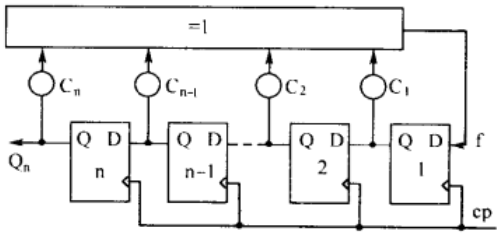


图 7-1　伪随机信号发生器结构图

1．伪随机信号发生器（PRBS）

伪随机信号发生器由移位寄存器和异或反馈网络构成，其一般结构图如图 7-1 所示。n 级 D 触发器构成移位寄存器，由异或组合逻辑输出 f 作为第一级输入。

$$f = C_1Q_1 \oplus C_2Q_2 \oplus \cdots \oplus C_iQ_i \oplus \cdots \oplus C_nQ_n \quad (7\text{-}1)$$

式中　C_i——系数；

Q_i——第 i 位触发器输出。

C_i 为 1 时，表示第 i 位的输出参加反馈；C_i 为 0 时，表示第 i 位的输出不参加反馈。所产生的序列信号状态共有 $2^n - 1$ 种状态。

下面就以一个四位的伪随机信号发生器为例来进行介绍，它是由四个移位寄存器和异或反馈网络构成的，如图 7-2 所示。其中，$C_1 = 1$，$C_4 = 1$，其余为 0，则 $f = Q_1 \oplus Q_4$。

四级 D 触发器总共有 $2^4 = 16$ 种状态，因此伪随机信号发生器的最大时序为 $2^4 - 1 = 15$。当 $Q_1Q_2Q_3Q_4$ 的初始状态为 1000 时，在 cp 脉冲的作用下，数据一级一级移存，在 Q_4 端的输出序列信号为不断重复的“000111101011001”，如表 7-1 所示。

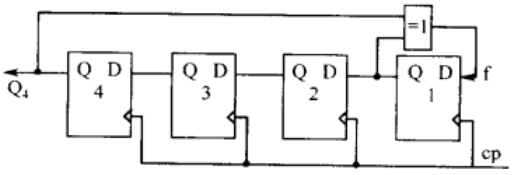


图 7-2　四位伪随机信号发生器

表 7-1　状态转移表

时钟周期	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	$D_1 = f = Q_1 \oplus Q_4$	时钟周期	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	$D_1 = f = Q_1 \oplus Q_4$
0	1	0	0	0	1	8	1	1	0	1	0
1	1	1	0	0	1	9	0	1	1	0	0
2	1	1	1	0	1	10	0	0	1	1	1
3	1	1	1	1	0	11	1	0	0	1	0
4	0	1	1	1	1	12	0	1	0	0	0
5	1	0	1	1	0	13	0	0	1	0	0
6	0	1	0	1	1	14	0	0	0	1	1
7	1	0	1	0	1	15	1	0	0	0	1

除了全 0 状态不能自启动外，共有 15 种有效状态，由此伪随机信号发生器所产生的信号具有随机信号序列的特性，但又可以重复。

2．特征分析法

如果取同一个伪随机信号发生器，并给它加上一个外部输入端，就能在伪随机序列上叠加一个外部输入。其简化图如图 7-3 所示。

此时的 f = 输入 + $(Q_1 \oplus Q_4)$，外加的外部数据将干扰发生器的内部工作时序。如果伪随

机信号发生器的初始状态为全 0，外部输入一个“10000……”的数据流信号，则可以得到如表 7-1 中所示，但却延迟了一个时钟周期的输出序列信号。若用变换算子 D 来表示，则

$$x(t-1)=Dx(t) \qquad (7\text{-}2)$$

即乘 D 等效于数据延迟一个时钟周期。那么就可以写出图 7-3 的特征方程为

$$f(x)=x(t)+Dx(t)+D^4x(t) \qquad (7\text{-}3)$$

式中　D^4——延时四个时钟周期。

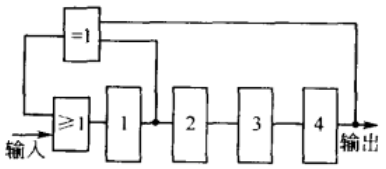


图 7-3　加外部输入的简化方框图

利用模 2 算术中加和减是相同的，而且没有借位这一特点，用外加的输入数据流除以特征方程的系数 11001 所得之商与伪随机信号发生器的输出序列完全相同，余数为“1”作为再次启动信号，产生重复的随机序列。

上述带异或反馈的移位寄存器是一个线性时序电路，它给各个输入的数据位以相同的权。如果将有误差的数据流输入其中，无论数据流有多长，最后都将会把误差的结果残留在这个四位的寄存器中，这个余数称为信号特征。带有误差的数据流的余数与正常的数据流的余数是不同的。因此，电路设计师可以利用特征分析法，用同样的移位寄存器测试数字系统中的待测点的数据流，在测试周期结束时，将余数标注在原理图或印制板的各测试点上，便于分析有故障的电路。

二、信号特征分析仪

HP5004A 型信号特征分析仪是一种使用较为广泛的分析仪，它运用信号特征分析法来检测数字系统的故障，并在仪器的面板上直接显示测试点的信号特征。

特征分析仪的伪随机信号发生器由十六个移位寄存器构成，其中有四级参与了反馈，如图 7-4 所示。

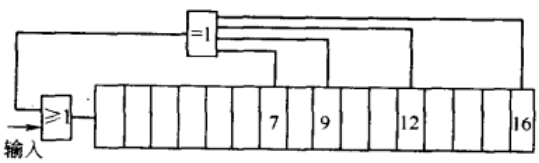


图 7-4　HP5004A 伪随机信号发生器方框图

特征分析仪在时钟沿的作用下，利用数据探头对输入信号进行采样，通过电平比较器判断出逻辑“1”或“0”。接下来送入伪随机信号发生器，数据进入后就随时钟同步移位直到测量结束时，在寄存器里留下 16 bit 数据，最终在面板上显示出来。由于信号特征分析法的实质是数据压缩，因而压缩后的数据有可能会丢失信息，采用十六个移位寄存器是为了减少丢失信息的可能性，而提高误差检测概率。该分析仪分析正常数据流的概率为 100%，分析故障数据流的概率为 99.998%。

第三节　逻辑分析仪

一、逻辑分析仪概述

逻辑分析仪常用于数字系统和设备的调试与故障诊断，特别是在微机系统的研制开发以及调试维修中，广泛应用。

逻辑分析仪常分为状态分析仪和定时分析仪两种。状态分析仪可以进行状态的显示、跟踪和故障诊断等；定时分析仪可以显示出微处理器的定时关系，例如，I/O 线之间的时间关系以及逻辑门之间的传输延迟等。

为了满足对数据流的检测要求，逻辑分析仪具有以下一些特点。

① 足够多的数据通道，便于多通道的同时观测。

② 具有多种触发功能，使逻辑分析仪能从大量的数据流中获得有分析意义的数据。

③ 具有多种取样方式。

④ 利用高速存储器快速记录数据，存储容量的大小决定获取数据的多少。可以存储触发前的数据，以利于分析故障。

⑤ 具有对获取的数据进行鉴别挑选的限定能力。

⑥ 为适应不同的逻辑分析，有多种显示方式。

⑦ 具有驱动时域仪器的能力。当数字系统的故障与时间有关时，可以驱动示波器来配合分析故障。

二、逻辑分析仪的基本工作原理

逻辑分析仪由数据捕获和显示两部分构成，其基本组成方框如图 7-5 所示。

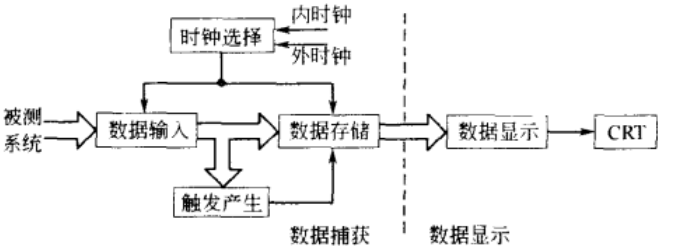


图 7-5　逻辑分析仪基本组成方框图

数据捕获部分的作用是快速捕获并存储要观察的数据。其中数据输入部分将各通道采集到的信号转换成相应的数据流；触发产生部分在数据流中搜索特定的数据字，当搜索到特定的触发字时，就产生触发信号去控制数据存储器；数据存储器部分根据触发信号开始存储有效数据或停止存储有效数据，以便将数据流进行分块（数据窗口）。

数据显示部分则将存储在存储器里的有效数据进行处理并以多种显示方式显示出来，以便对捕获的数据进行分析和观察。

逻辑状态分析仪内部没有时钟发生器，用被测系统时钟来控制记录速度，与被测系统同步工作，对解决程序的动态调试非常有效；逻辑定时分析仪内部有时钟发生器，在内时钟控制下记录数据，与被测系统异步工作，主要用来调试检测硬件。为提高测量精度和分辨力，定时分析仪的内时钟频率应远高于被测系统的时钟频率。

三、数据捕获与触发跟踪

数据捕获部分的作用是在测试的数据流中开个窗口，把对分析有意义的数据存入到逻辑分析仪的存储器中，窗口的大小就是存储器的容量。它由输入探头、触发产生和数据存储三部分组成。

（一）输入探头

是用来连接逻辑分析仪与被测系统的，按用途分为数据探头和时钟探头两种，其结构大致相同。对于具有多通道的逻辑分析仪来说，各个通道的输入探头电路是完全相同的。如图

7-6（a）所示为数据探头的示意图，它是高速高输入阻抗的有源探头。输入的数据信号通过比较器与阈值电平进行比较，如果输入信号大于阈值电平，输出为逻辑“1”，反之为逻辑“0”，如图 7-6（b）所示。为检测不同逻辑电平的数字系统（如 TTL、ECL、CMOS 等），阈值电平一般在 -10～+10 V 范围内可调。

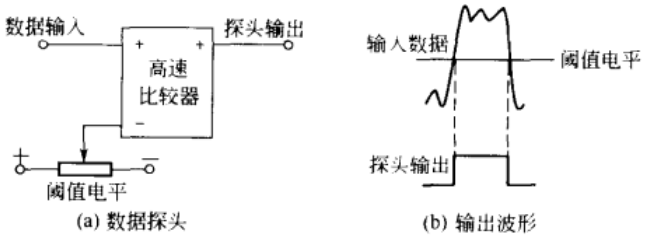


图 7-6　数据探头及其输出波形

时钟探头接在被测系统的时钟上，作为分析仪的采样时钟。为了与数字系统采样时钟沿（上升沿或下降沿）保持一致，时钟探头应能选择上升沿或下降沿，如图 7-7 所示。由此，时钟探头与数据探头的区别仅在于：输入的时钟经带有互补输出的比较器后，即可根据需要产生上升沿和下降沿的时钟输出。

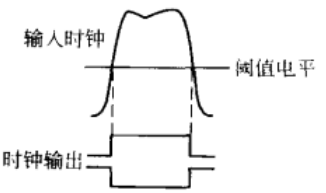


图 7-7　时钟输入探头及其波形

（二）数据捕获

在逻辑分析仪中，数据捕获方式一般有以下三种。

1．取样方式

取样方式是当取样脉冲到来时，对探头中比较器输出的逻辑电平进行判断。如果比较器的输出为低电平，则取样电路的输出亦为低电平，且一直维持到下一个取样脉冲到来为止；如果比较器的输出为高电平，则取样电路的输出亦为高电平，且一直维持到下一个取样脉冲到来为止，如图 7-8 所示。显然，取样方式所显示的波形不是被测信号的实际波形，而是一种伪波形，反映不出信号的时域特点，特别是不能对发生在时钟脉冲之间的毛刺脉冲进行取样，而毛刺常是硬件故障产生的原因。

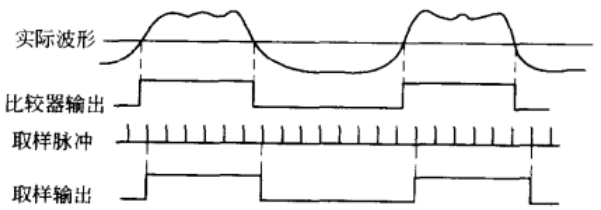
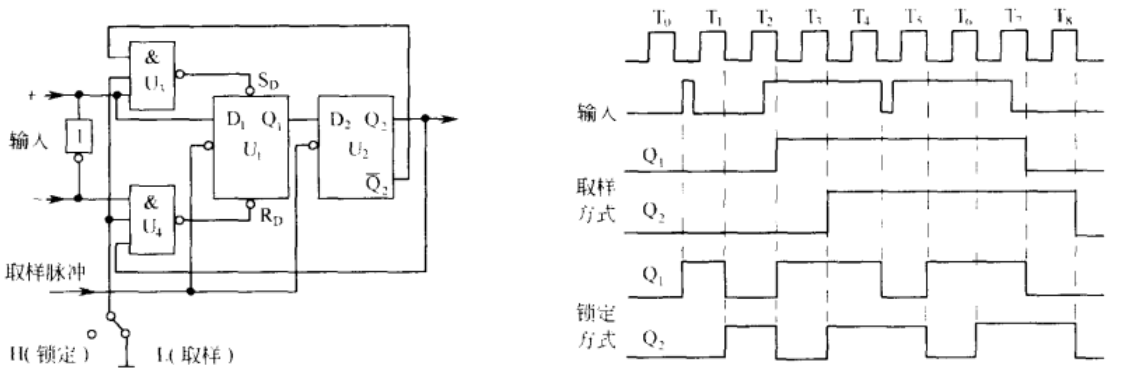


图 7-8　取样方式原理图

2．锁定方式

锁定方式是专门用来捕捉出现在两个取样脉冲之间的毛刺的。在锁定方式下，逻辑分析仪内部的锁定电路能捕捉到毛刺并把一个很窄的毛刺展宽，一般可以捕捉到 1 ns 的窄脉冲，并把毛刺信号展宽为一个取样时钟周期，以便于观察和分析。图 7-9（a）所示为取样/锁定方式的逻辑工作原理图，当选择“锁定”方式时，就可以发现发生在时钟周期间的毛刺脉冲，并在 Q_2 输出端复现毛刺为一个时钟周期宽度，如图 7-9（b）所示。若要只取出毛刺脉冲，可将两种方式的输出信号异或即可。



(a) 工作原理图　　(b) 逻辑波形图

图 7-9　取样及锁定方式电路和波形图

这种方法的优点是线路简单，但是不能检测在信号中跳变沿上出现的毛刺，也不能分辨连续出现的毛刺。为此逻辑定时仪中还有一种检测毛刺的方法即毛刺方式。

3. 毛刺方式

毛刺方式从毛刺的基本概念出发（即在一个取样周期内，出现两个方向逻辑跳变的窄脉冲），采用双向跳变电路检测毛刺。如果检测到某一通道在取样点的信号电平是“0”，在同一个取样周期内再出现从逻辑“1”向“0”的跳变，就将它存入毛刺存储器内，在显示的时候，用一个加亮的竖线叠加到波形上来显示毛刺，如图 7-10（a）所示；如毛刺出现在跳变沿上，也同样用加亮的竖线来表示，如图 7-10（b）；如毛刺和异步时钟沿同时出现时，将像锁定方式一样显示一个时钟周期，如图 7-10（c）所示。



(a) 用加亮竖线显示毛刺　(b) 用加亮显示毛刺在跳变沿　(c) 毛刺和异步时钟沿同时出现

图 7-10　毛刺方式

（三）触发与跟踪

对于一个正在运行的数字系统来说，数据流是无穷尽的，而存储数据的存储器的容量和显示数据的显示器尺寸却是有限的。因此，要把所有数据存储后进行显示是不可能的。如何找到对分析有意义的数据流并将它们存储下来加以显示就变得尤为重要。在逻辑分析仪中，通常利用设置触发字的方法来对数据流分段，就好比在数据流中开一个窗口。在测试过程中，若预先设置的触发字与输入的数据相符时，就产生触发，分析仪找到所需的数据并显示出来，这一过程称为跟踪。如图 7-11 所示，预置触发字为“1111”，当 CH_1、CH_2、CH_3、CH_4 通道上的数据流在某一时刻同时为“1111”时，即产生触发。

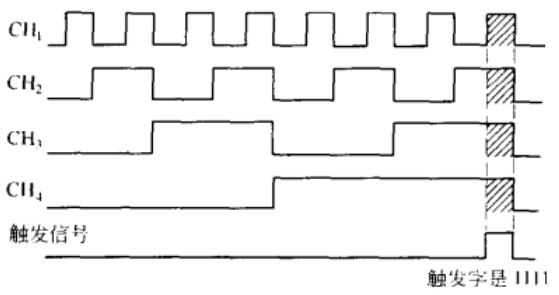


图 7-11　预置触发字

以触发字为基础，再加上触发限定条件，即可实现多种触发方式的选择以满足不同的分析要求。如图 7-12 所示，利用“触发识别”选择出符合预置触发字的触发信号；利用“限定识别”选择出识别信号，二者相与选择出受限定的触发信号；时钟信号与限定识别信号相与选择出受限定的时钟信号，控制存储器的写时钟。

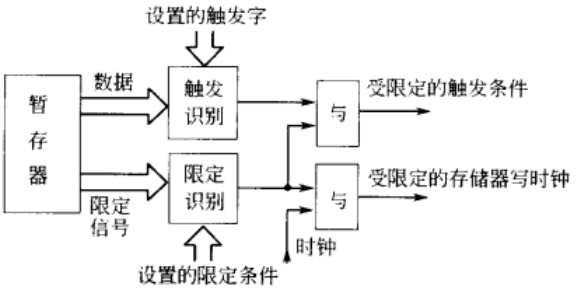


图 7-12　触发电路方框图

所有的逻辑分析仪都有触发功能，常用的有以下几种。

1．基本触发

主要有始端触发和终端触发两种方式。

当分析仪识别出触发字时，就开始存储有效数据，存满为止。存储器中存储的是从触发开始以后的数据，在显示器上显示的是以加亮成反底的触发字为首的一组数据字，这就是始端触发，如图 7-13（a）所示。

当分析仪判定存储器中存满新数据后，就开始搜索触发字，一旦识别出触发字，就停止存储，这样保存在存储器中的数据是以触发字为终点之前的数据，在显示器上显示的数据，以加亮成反底的触发字在最后一行。这就是终端触发，如图 7-13（b）所示。

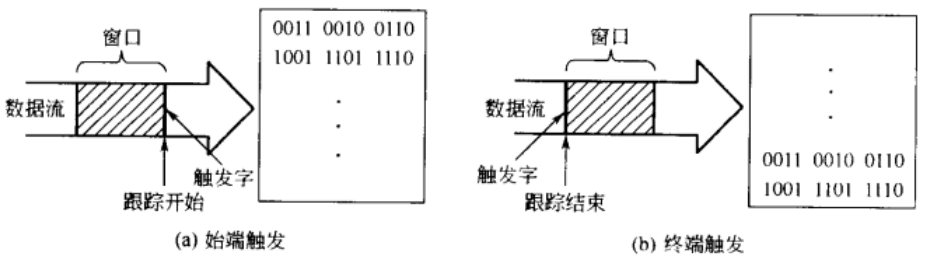


图 7-13　基本触发功能

2．延迟触发

延迟触发是当分析仪在数据流中搜索到触发字时，并不立即跟踪，而是延迟一定数目的数据字以后，才开始或停止存储有效数据，延迟触发可以改变数据窗口与触发间的相对关系。延迟触发可以和始端触发及终端触发相配合使用，如图 7-14（a）所示为始端触发加延迟；图 7-14（b）所示为终端触发加延迟，若选择延迟数等于存储器容量的一半时，触发字位于窗口的中间，这称为中间触发，可以捕获到触发前后的数据。

3．序列触发

序列触发是为了检测复杂分支程序而设计的。它由多个触发字按预先设定的次序排列，而当被观察的程序按同样的顺序先后满足触发条件时，分析仪才能触发跟踪。如图 7-15 所

示，只有依次满足条件 A→B→C→D→E 后，分析仪才能触发。

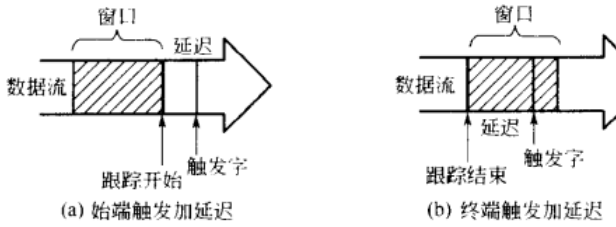


图 7-14　延迟触发

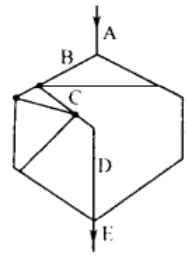


图 7-15　序列触发

4．毛刺触发

用在指定通道上检测出的毛刺作为触发信号，触发逻辑定时仪实现对数据的跟踪被称为毛刺触发。在数据字系统中，经常有毛刺出现，但并不是所有的毛刺都会带来问题，所以应当把可能造成问题的毛刺分离出来。因此常将可能要出现问题的状态和毛刺一同定为触发条件，即当指定输入线上的毛刺和给定的状态都出现时分析仪就将被触发。如图 7-16 所示，输入信号为高电平时为可能出现问题的状态，由于探头对输入信号的采样是在时钟沿上进行的，因此毛刺 1 和毛刺 2 均满足触发条件。

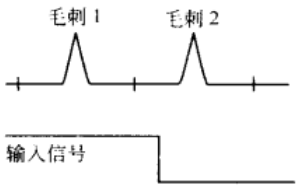


图 7-16　毛刺触发

（四）数据的存储

数据采样以后要存入存储器，通常是将数据流存入到随机存储器中。存储器的存储方式可以有不同的形式。

1．顺序存储

存储器的容量是有限的，每个有效时钟到来时，将存入新的数据，这些数据逐步移位，因此采用先进先出的顺序存储方式。按地址顺序存入数据，存满以后再输入新的数据时，最先存入的数据将溢出而被冲掉，这样存储器中始终保存着最新采样的一段数据。取数时按首地址开始顺序取数，先进先取数。

2．选择性存储

选择性存储可以有效地利用存储空间，只选择数据流中的特殊部分来存储。例如，用一个附加条件来选通时钟，称为时钟限定。如图 7-17 所示，图中假设对存储器的读操作进行检测，故选择存储器的读、写信号作为时钟限定信号。若限定“1”有效，则读/写信号为高电平时，分析仪对读操作数据进行取样；若限定“0”有效，则读/写信号为低电平时，分析仪对写操作数据进行取样。图中示出了时钟限定条件为“1”时所得的结果。

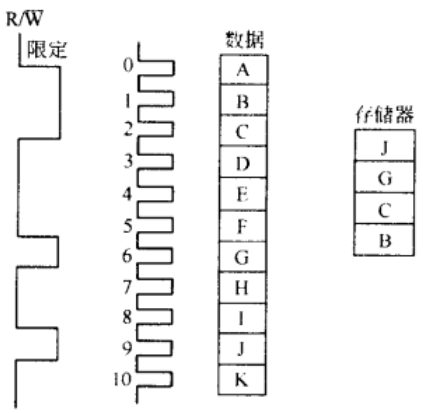


图 7-17　选择性存储

（五）数据的建立时间和保持时间

为了保证逻辑分析仪所捕捉数据的准确性和可靠性，还必须注意取样时钟与被测数据的时间关系。因为逻辑分析仪是在时钟跳变沿将数据存储到存储器中的，由于系统内各数字信号的跳变时间不一致以及存储器输入端寄生电容等因素的影响，在时钟跳变沿到来之前，数

据流就应出现在存储器的输入端，并保持一段时间。因此，所谓建立时间 T_s，就是在时钟跳变之前，数据必须提前出现在存储器输入端的最小时间；保持时间 T_h，就是在时钟跳变之后，数据必须继续保持的最小时间，如图 7-18 所示。

数据建立时间和数据保持时间之和决定了能够检测到的数据的最小时间间隔，即最高取样速率。在很多数字系统中，数据是在有效时钟的几个毫微秒之内变化，为使逻辑分析仪跟踪上当前的数据，还应使分析仪具有零保持时间。

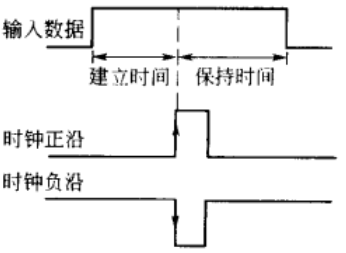


图 7-18　数据建立与保持时间

四、数据显示

为了对数字系统进行有效地分析，逻辑分析有多种显示方式。

（一）状态表显示

状态表显示用于逻辑状态分析仪。这种方式是用字符组成不同形式的表格来显示数字系统的逻辑状态或程序。通常状态表可采用二、八、十、十六进制字符或 ASC Ⅱ 码。对于带微机的系统，逻辑分析仪将采集到的数据进行反汇编，以助记符形式显示总线上数据，这种显示结果可以直接和程序表进行比较，以便于软件的诊断以及监视系统的运行。

（二）D/A 显示

D/A 显示是把状态表显示图形化，以便对数据流进行快速宏观分析。用一系列光点组成一个图形来表示一个状态序列，其中每一个光点代表一个数据字。光点的 X 坐标表示执行顺序，Y 坐标表示每个数据字的数据值（即等效模拟量），如图 7-19 所示。

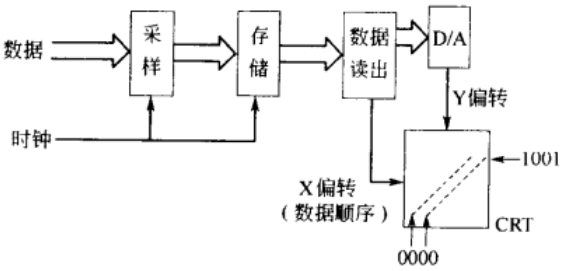


图 7-19　D/A 显示

（三）映射图显示

映射图也称点图，通过它可以获得程序流活动的宏观概貌。把存储器中获取的每个数据字分成低位和高位两部分，再分别经 D/A 转换器转换成模拟信号，驱动 CRT 的 X 轴和 Y 轴偏转合成一个光点。每个数字系统都有自己的映射图，如图 7-20 所示。

在复杂的系统中，各种显示方式可以相互补充。例如，分析故障时，首先有映射图对系统进行全面考察，根据图形的变化，指出问题的大致范围，然后用 D/A 显示作详细检查，缩小故障范围，最后用状态表找出错误的字和位。

（四）定时图显示

定时图显示用于逻辑定时分析仪。定时仪在内时钟沿上采样，与被测系统异步工作，它将每个数据通道的信号显示成一个时间关系图，如图 7-21 所示。与示波器不同，它显示的并不是信号的真实波形，而是在内时钟沿上信号的逻辑电平（1 或 0），并且这些电平停留的

时间为一个内时钟取样周期，没有信号的瞬变过程，振荡或噪声等时域的测量特征。

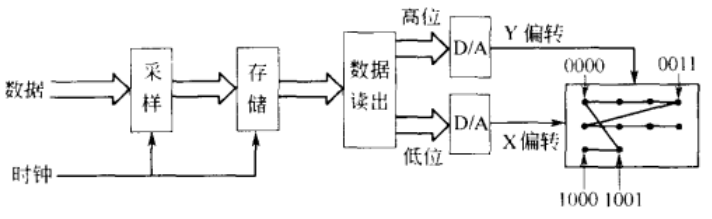


图 7-20　映射图

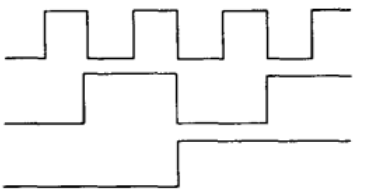


图 7-21　定时图

本　章　小　结

1．数据域测试研究的内容是在某个事件中，通过一个数据字的变化来反映系统的特征是正常还是有故障。数字系统的测试包括参数测试和逻辑测试。

2．特征分析仪利用伪随机信号发生器将数据流进行压缩，检验出有误差的数据。

3．逻辑分析仪具有多个通道、可存储触发前的数据、可检测出时钟间的毛刺脉冲等特点。其基本组成分为两部分：数据捕获和数据显示。

4．逻辑分析仪的数据捕获方式有：取样方式、锁定方式、毛刺方式。

5．逻辑分析仪的触发方式有：基本触发方式、延迟触发方式、毛刺触发方式、序列触发方式。

6．逻辑分析仪的存储方式有：顺序存储方式、选择性存储方式。

7．逻辑分析仪的显示方式有：状态表方式、D/A 显示方式、映射图显示方式、定时图显示方式。

思考题与习题

7-1　信号的数据域测试有什么特点？

7-2　什么是信号特征？信号特征分析法中伪随机信号发生器的作用是什么？

7-3　逻辑状态分析仪与定时仪在工作原理及应用上有什么不同？

7-4　试分析图 7-9（a）的逻辑电路图在取样方式时的工作原理及在锁定方式时的工作原理。

7-5　逻辑分析仪的几种触发方式各有什么用途？

7-6　状态表显示、D/A 显示、映射图显示各在什么场合下应用？

第八章　自动测试技术



目的与要求　随着科技的发展和电子技术的广泛应用，对自动测试技术提出了越来越高的要求。本章重点要求掌握自动测试系统的基本结构、通用接口总线系统的结构性能和总线中信息传递的过程、VXI 总线的结构和器件分类、智能仪器的结构以及虚拟仪器的结构。

第一节　自动测试系统的基本结构

近代科学技术的迅速发展使生产效率越来越高，产品的研究和开发也越来越深入和复杂。在大规模生产和研发中，要求测试的项目、内容日趋复杂，不但工作量大，而且测量的精度和速度要求也很高，通常还伴随着大量的数据处理和统计运算的工作。在这种情况下，靠人工和简单功能的仪器进行测试已不能胜任，如何解决测试技术的自动化问题就显得尤为重要。计算机技术、实时采样技术、频率合成技术的发展和成熟给自动测试技术奠定了基础。检测技术、传感器技术、数据传输和处理技术以及大规模集成电路技术的发展，尤其是单片计算技术和计算机科学的飞速发展，为测试技术的自动化提供了必要的技术条件和手段。

通常将在计算机控制下，能自动进行测量、数据处理、传输，并以适当方式显示或输出测试结果的系统称为自动测试系统，简称 ATS（Automated Test System）。在自动测试系统中，整个工作都是在预先编制好的测试程序统一指挥下完成的，系统中的各种仪器和设备都应是智能化的仪器和设备，可进行程序控制。

自动测试技术创始于 20 世纪 50 年代，从 20 世纪 50 年代至 21 世纪的今天大致分为以下三代。

一、第一代自动测试系统

从第一代自动测试系统开始就采用了计算机技术，主要用来进行逻辑定时控制。主要功能是进行数据自动采集和自动分析，而且还要完成大量重复的测试工作，承担繁重的数据运算和分析任务。系统中的仪器采用专用接口，因此系统的通用性差。

二、第二代自动测试系统

为了系统组建方便，第二代自动测试系统中的仪器应采用标准化的通用接口。这样就可以把任何一个厂家生产的任何型号的可程控仪器连接起来形成一个自动测试系统。第二代自动测试系统的典型方框图如图 8-1 所示。

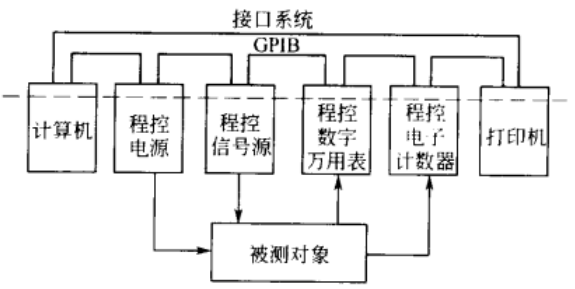


图 8-1　自动测试系统示意框图

所有的程控仪器、设备都简称为器件，各器件均配备标准接口，并联在通用接口总线上。因此各器件可用于任何一个自动测试

系统，也可以作为单个仪器在系统以外使用。一个自动测试系统也可以作为另一个系统中的子系统而成为其一个器件。

在第二代自动测试系统中，应用最为广泛的是通用接口总线（General Purpose Interface Bus，简称 GPIB）。它有以下几个版本：美国 HP 公司于 1972 年首先提出来的 HP-IB；1978 年由美国电气与电子工程师学会接受后并颁布的 IEEE-488 标准；1979 年由国际电工委员会接受后并颁布的 IEC-625 标准等；1984 年由中国开始实施的 ZBY207-84 标准。

第二代自动测试系统具有：测量速度快、高精度和高分辨力、多功能和多种参数的测量、频带宽、量程宽、自校正、自诊断以及多种显示与输出方式等优点。

三、第三代自动测试系统

第二代自动测试系统虽然比人工测试具有无比的优越性，但是计算机的能力并未得到充分的发挥，计算机和测量系统尚未融为一体。20 世纪 70 年代末，又提出了第三代自动测试系统的概念。第三代自动测试系统设计目标是：充分发挥计算机的能力，取代传统电子设备的大部分功能，使之成为测量仪器一个不可分割的组成部分，与整个测试系统融为一体，使整个自动测试系统简化到仅由计算机、通用硬件和应用软件三部分组成。特别是在 1987 年推出了一种名为 VXI 的新型计算机仪器系统总线标准后，出现了基于 VXI 总线的模块化自动测试系统以及虚拟仪器。

第二节　接口总线系统与智能仪器

一、通用接口总线系统 GPIB

GPIB 标准接口总线规定了接口在机械、电气和功能三个方面的有关要求和标准，保证了系统中仪器相互连接的兼容性。GPIB 把实现自动测试控制所必须具备的逻辑功能概括为十种接口功能，不同的设备接口可按需选择。

（一）GPIB 的基本性能

① 系统各器件采用总线方式连接，总线连接器包括插头和插座。

② 总线由 24 芯电缆组成，其中 8 条数据线，3 条挂钩线，5 条接口管理线，其余的为屏蔽线和地线。

③ 总线上最多可挂 15 台仪器，每增加一个接口，可以多连 14 台仪器。

④ 互连电缆的传输总长度不超过 20 m，或仪器数目乘仪器间的电缆长度不超过 20 m。

⑤ 总线以比特（位）并行、拜特（字节）串行，采用三线挂钩技术双向异步通信。

⑥ 最大传输率为 1 MB/s。

⑦ 系统内的仪器地址采用 5 位二进制编码，共有 31 个讲地址和 31 个听地址，如果采用扩展的话可有 961 个讲址和 961 个听地址。

⑧ 总线上的逻辑采用负逻辑，低电平≤ +0.8 V，记为逻辑“1”；高电平≥2.0 V，记为逻辑“0”。

（二）GPIB 的结构和功能

1．接口要素

接口的目的在于提供一种有效的通信联络手段，以便能在一组互相联系而构成一系统的

器件中间进行毫不含混的信息交换。为此，各器件的接口在机械上、电气上、功能上必须相容，在运行上必须规范。

（1）机械上的相容性　接插头、插座的尺寸，信号线的数目以及位置必须相同。

（2）电气上的相容性　每条信号线所允许的电压和电流大小，以及逻辑电平、逻辑极性等必须相容。

（3）功能上的相容性　接口功能、接口消息以及编码惯例等必须相容。

以上三个要素通常被称为接口三要素，它们不管器件的特性和运行而作统一规定。

（4）运行上的相容性　包括测量数据的表示方法和编码格式、程控指令的格式等。这些是与器件本身的特性和运行有关。

2．系统的三种基本功能

自动测试系统中，不论系统大小、各器件的数据交换是如何频繁和复杂，系统中的器件从作用功能上来讲只有三种。

（1）控者　有些仪器设备可以对系统中的其他器件进行寻址或发出管理信息，具有控制整个系统协调工作的能力，这种仪器或设备称为控制器，简称控者。如专用控制器、计算机等。

（2）讲者　有些仪器设备可以通过接口发送各种数据和信息，称为讲者。如数字电压表、计算机等。

（3）听者　有些仪器设备能够通过接口接收数据，称为听者。如打印机、计算机等。

系统工作时，在某一时刻只能有一台设备是控者，一台设备作为讲者，其余作为听者或处于空闲状态，否则就会使系统的工作发生混乱。

3．消息

自动测试系统中，在总线上传送的所有信息统称为消息。消息可分为接口消息和仪器消息，如图 8-2 所示。

（1）接口消息　它是用于实现并管理各种接口功能的控制、挂钩和命令等信息的总称。它只能为仪器的接口功能所接收和利用。接口消息可以通过 8 条 DIO 线来传送，这种用多条 DIO 线传送的消息又称为多线消息。其一般由通令、寻址命令和地址三类消息构成。

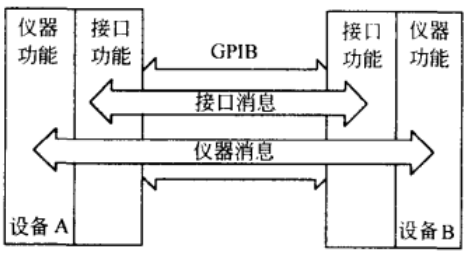


图 8-2　接口消息与仪器消息

① 通令。它是由控者发布，被总线上所有仪器设备所必须听从和执行的命令。通令的编码格式为：X001XXXX，其中低四位表示不同的通令编码。GPIB 中使用了五种，如表 8-1 所示。例如，本地封锁 LLO 的编码为：X0010001，它表示控者封锁器件面板上的远地/本地控制按钮，使它不起作用，这时的远地/本地控制由程序来控制。

② 寻址命令。它由控者发布，只被寻址的仪器设备所听从执行。寻址命令的编码格式为：X000XXXX，其中低四位表示不同的寻址命令编码。GPIB 中使用了五种。如表 8-1 所示。例如，执行群触发 GET 的编码为：X0001000，它表示被寻址的器件执行触发操作。

③ 地址。地址用来区分系统内的不同仪器设备，以便进行正确的数据传送。一个系统设备的地址可以有以下三种：讲地址、听地址和副地址。讲地址码编码格式为：$X10T_5T_4T_3T_2T_1$，听地址码编码格式为：$X01L_5L_4L_3L_2L_1$，副地址编码格式为：

$X11S_5S_4S_3S_2S_1$。其中低五位则可编码组成 31 个讲地址、31 个听地址和 31 个副地址（全 1 除外）。副地址跟在讲地址和听地址后面构成扩展地址，地址数可以扩大 31 倍。仪器的地址确定后，控者向总线发送讲地址和听地址码来完成对仪器的寻址。为了完成寻址，仪器内部一般都设置有地址识别电路。另外仪器的后面板上一般还设有地址开关，以便人工指定仪器的地址。

④ 副令。副令跟在主令后面，是对主令的补充，只有两条：并行点名可能和并行点名不可能。

表 8-1　多线消息及其编码

类别	名称	助记符	编码格式							
通令	本地封锁	LLO	X	0	0	1	0	0	0	1
	仪器清除	DCL	X	0	0	1	0	1	0	0
	发起串行点名	SPE	X	0	0	1	1	0	0	0
	撤消串行点名	SPD	X	0	0	1	1	0	0	1
	并行点名不编组	PPU	X	0	0	1	0	1	0	1
寻址命令	执行群触发	GET	X	0	0	0	1	0	0	0
	进入本地	GTL	X	0	0	0	0	0	0	1
	并行点名编组	PPC	X	0	0	0	0	1	0	1
	选定部件清除	SDC	X	0	0	0	0	1	0	0
	取控	TCT	X	0	0	0	1	0	0	1
地址与副令	讲地址	MTA	X	1	0	T_5	T_4	T_3	T_2	T_1
	听地址	MLA	X	0	1	L_5	L_4	L_3	L_2	L_1
	副地址	MSA	X	1	1	S_5	S_4	S_3	S_2	S_1
	发起并行点名	PPE	X	1	1	0	S	P_3	P_2	P_1
	撤消并行点名	PPD	X	1	1	1	D_4	D_3	D_2	D_1

（2）仪器消息　它是仅与系统中仪器设备本身工作密切相关的一些信息和数据。它也通过接口总线传送，但它穿越接口功能区，仅为仪器功能所接收和利用。仪器消息分程控命令、测量数据和状态数据三类。仪器消息与仪器设备本身特性密切相关，因此难以作出统一规定，只有大致的语法规则。

① 程控命令。当自动测试系统中的程控仪器一旦被寻址为听者，且同时处于远控模式，则该仪器就可以接收由控制器发来的程控命令，并按命令进行操作或测量。程控命令也是以数据方式传输的，所以程控命令也叫程控代码，有规定的编码格式。例如，某一自动测试系统采用 9830A 编程计算器作为控制器，向系统中的一可程控仪器 HP3455A 电压表发送的程控命令如下：

地址码　　操作码

CMD "? U 6", "F1 R3 A0 H1 M3 T3"

在这条程控命令中，地址码是用来寻址的，属于接口消息。其中：

CMD 表示命令，这是一个控制语句，与所采用的控制器有关；

? 表示控制器发不听命令，禁止系统中的一切仪器工作；

U 表示控制器发的讲地址，控制器被寻址为讲者后，作好发送程控操作码的准备；

6 表示控制器发的听地址，电压表被寻址为听者后，作好接收程控操作码的准备。

地址码传送完毕，开始传送程控操作码，属于仪器消息。其中：

，表示定界符，用来区分两类不同的消息；

F1 表示功能是直流电压；

R3 表示量程是 10 V 挡；

A0 表示自动校准断开；

H1 表示高分辨率接通；

M3 表示数学处理程序断开；

T3 表示触发设置在保持/手动方式。

② 测量数据　仪器所获得的数据，经编码后在讲者和听者之间传送。

③ 状态数据　反映仪器内部状态的一种数据，如忙、闲、准备好等。

在实际工作中，按消息的来源还可把消息分为远地消息和本地消息。只有远地消息通过总线传送。本地消息仅在仪器内部传送，它们不会进入总线。

4．总线的组成

GPIB 采用 24 芯总线，分为数据总线、挂钩线和管理总线三种。其总线的基本结构如图 8-3 所示。

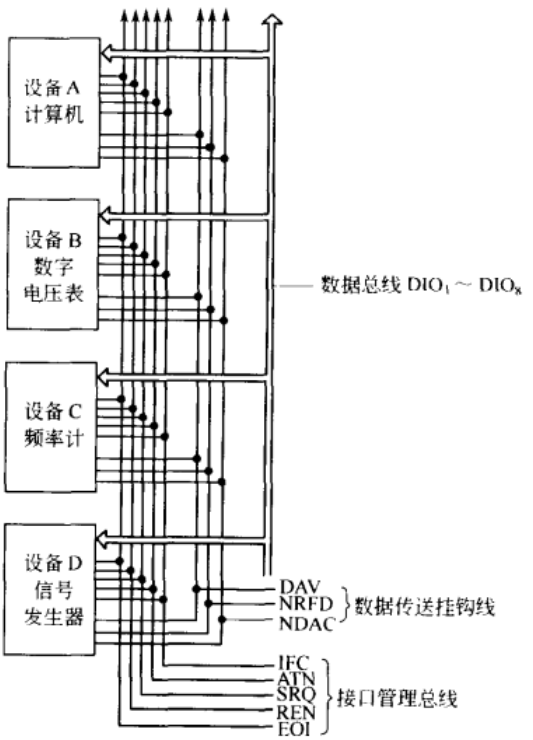


图 8-3　GPIB 的基本结构

（1）数据总线　GPIB 中数据总线 8 条，标名为 DIO_1～DIO_8。这 8 条 DIO 线用于传送系统内一切远地消息，包括仪器消息和接口消息。

（2）数据传送挂钩线　挂钩线有 3 条，用来实现讲者和听者之间的通信联络，确保数据总线能够准确无误、双向异步、有节奏地传输消息，这种传输方式称为三线挂钩。这三条控制线称为挂钩线，它们分别如下。

① DAV（Data Valid）　数据有效线。当为低电平（逻辑“1”）时，源方向受者表示 DIO 线上载有信息，并且有效，各听者可以接收；当 DAV 为高电平（逻辑“0”）时，表示 DIO 线上没有信息或者即使有信息也无效，听者不应该接收。

② NRFD（Not Ready For Data）　未准备好接收数据线。此线为各听者所共用，用来向源方表明听者接收数据的准备情况。当 NRFD 为高电平（逻辑“0”）时，各听者向讲者或控者表明，所有听者都已准备好接收数据；当 NRFD（逻辑“1”）为低电平时则表明有部分听者或全部听者还没有准备好接收数据。

③ NDAC（Not Data Accepted）　未接收数据线。此线为各听者共同使用。当 NDAC 为低电平（逻辑“1”）时，表明部分听者或全部听者尚未接收完数据，讲者或控者必须继续等待，不更新 DIO 线上的数据，直到全部听者都已接收完数据即 NDAC 变为高电平（逻辑“0”）为止。

（3）接口管理总线　接口管理总线共有 5 条，用来管理接口本身的工作。它们所载有的

信息为系统中各台设备通用，被控者选定的仪器都必须接收。

① ATN（Attention)注意线。ATN线由控者使用。当ATN为低电平时，表示数据总线上由控者发布的信息是接口信息，除控者外的所有仪器都要注意接收；ATN为高电平时，表示数据总线上所载的信息是由讲者输出的仪器信息，只有已经被寻址为听者的那些仪器设备才能接收。

② EOI（End or Identify)结束或识别线。EOI线由控者使用。EOI线与ATN线配合使用有两个作用：当EOI线为低电平，ATN线为高电平时，表示讲者已经传完一个字节的数据；当EOI线为低电平，ATN线也为低电平时，由控者进行点名，用来识别哪个设备提出了服务请求。

③ SRQ（Service Request)服务请求线。当具有服务请求功能接口的仪器在需要向控者请求服务时，可将SRQ线由高电平变为低电平，以便向控者表明要求服务，即要求控者中断当前的工作程序，希望由将它变成讲者，报告情况。

④ IFC（Interface Clear)接口清除线。它由控者使用，当IFC线由高变低时，命令系统的全部接口恢复到初始状态。

⑤ REN（Remote Enable)远控线。当有一台可程控仪器不接入系统而单独使用时，将REN线设为高电平即可，这时该仪器工作时只受面板的控制；当要将仪器接入一个自动测试系统中并成为系统中的一个器件时，由控者将REN线设为低电平并配合ATN线，接入的仪器就能接受系统控制了。

5．接口功能

接口功能是系统中各仪器设备和总线连接时接收、处理和发送消息的能力，具体分为十种。

（1）SH（Source Handshake） 源挂钩能力。它是数据传送过程中的源方用来向受方进行挂钩联络的。它向总线输出“数据有效或无效消息”，并检测受方通过总线发来的“未准备好或已准备好接收数据消息”以及“未收到或已收到数据消息”的挂钩联络信号。SH功能是系统中的讲者或控者必须配置的接口功能。

（2）AH（Acceptor Handshake） 受者挂钩能力。它是数据传送过程中的受方用来向源方进行挂钩联络的。它向总线输出“未准备好或已准备好接收数据消息”、“未收到或已收到数据消息”，并检测源方通过总线发来的“数据有效或无效”的挂钩联络信号。AII功能是系统中的听者必须配置的接口功能。

（3）T（Talker or Extended Talker） 讲者功能。它用来将程控数据、测试数据或状态字节通过接口系统发送给其他设备。只有被寻址为讲者的设备在发送信息时才具有这种能力。具有讲者功能的设备必须同时具备源功能。

（4）L（Listener or Extended Listener） 听者功能。它用来接收来自讲者或控者的消息，并且只有受者功能通过三线挂钩来接收信息。

（5）C（Controller） 控者功能。它用来向系统中的其他设备发送各种接口信息或对各部分进行串行点名或并行点名以便确定哪台设备提出了服务请求。只有在系统中起控制作用的设备才具有控者功能。

（6）SR（Service request） 服务请求功能。当系统中的某一个设备在运行过程中遇到诸如过载、程序不明、测量结束或出现故障等情况时，该设备的SR功能就通过SRQ线通知控者。当控者完成了正在进行的一个信息传输后，立即中断原程序，转向串行点名，找到

“请求服务者”，了解请求内容并采取相应的措施。

（7）RL（Remote Local）　远地/本地控制。在没有进行远地控制之前，系统中所有程控设备都在各自的本地控制下工作。当控者使 REN 线从高电平变为低电平时，同时令 ATN 线为低电平，再发出一个本地封锁命令，使所有设备面板上的返回本地按钮不起作用，而处于远地控制。

（8）PP（Parallel Poll）　并行点名功能。控者为了定期检查并获得系统中的各台仪器的工作状态，要向系统中各仪器设备同时发出并行点名的信息，各设备接收到此信息后只有那些配有 PP 功能的仪器通过预先分配给它的某条 DIO 线作为响应线做出响应，控者依据 8 条数据总线的电平高低就可知道有无服务请求以及是哪些设备提出了服务请求。

（9）DT（Device Trigger）　器件触发功能。它是用来启动系统中的某一台或几台设备。在具有 DT 功能的某设备收到控者发来的要求触发的接口信息之后，就通过接口中的仪器触发功能发出一个内部信息，启动本设备工作，并开始执行规定的操作。

（10）DC（Device Clear）　器件清除功能。当设备收到控者发来的仪器清除信息后，通过仪器接口内的 DC 功能发出一内部信息使该设备恢复到初始状态。DC 是通过数据总线发送过来的，而接口清除信息 IFC 是通过接口清除线发送的。

由此，在十种接口功能中，源挂钩、受者挂钩、讲者、听者和控者五种接口功能是最基本的功能。每台仪器并非要将十种接口功能配置全，例如，一个信号源就只需配 AH、L、RL 和 DT 等接口功能就行了。数字电压表只需配 AH、SH、L、T、SR、RL 和 DC 等功能。

（三）三线挂钩技术

三线挂钩技术就是利用 DAV、NRFD 和 NDAC 三条线来控制信息从源方向受者进行传送的过程。三线挂钩技术的工作过程如图 8-4 所示。

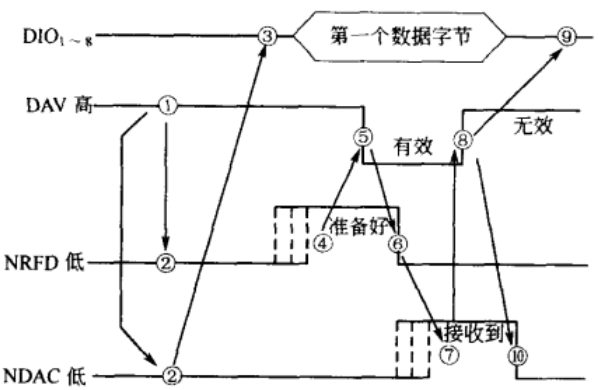


图 8-4　三线挂钩过程示意图

① 源方开始令数据有效 DAV 线为高电平，这时数据无效。

② 受者开始令 NRFD 线和 NDAC 线为低电平，表示所有受者都没有准备好接收数据以及没有一个受者接收到数据。

③ 源方检查 NRFD 线和 NDAC 线是否均为低电平，如果是，就将第一个字节的数据放到数据总线上去。

④ NRFD 线由低电平变为高电平，表示各受者都已准备好接收数据，其中虚线表示不同受者发出已准备好接收数据的时间是不同的。

⑤ 源方发现 NRFD 线为高电平，遂令 DAV 线为低，表示此时 DIO 线上的数据已经稳定而且有效。

⑥ 第一个受者（速度最快的一个）在接收数据后令 NRFD 线变为低电平，表示已开始接收数据，其他受者随后以各自的速度相继接收数据。

⑦ 第一个受者令 NDAC 线为高电平，表示已接收完数据，但由于其他受者尚未接收完数据，故 NDAC 线仍为低电平。直到最后一个受者接收完数据，这时 NDAC 线才变为高电平。

⑧ 源方发现 NDAC 线为高电平后，遂令 DAV 线为高电平，向受者表明 DIO 线上数据已无效。

⑨ 源方撤离数据总线上的数据字节。

⑩ 各受者得知 DAV 线为高电平后，就令 NDAC 线为低电平，为下一次接收作好准备，三线重新处于初始状态。

使用三线挂钩技术，使数据传输过程中具有不同速率的源方和受者之间能实现自动协调，保证了传输数据的可靠性。

源挂钩能力和受者挂钩能力只能对源方和受者之间起联系作用，不能直接执行发送和接收数据的任务，这一任务是由讲者功能和听者功能完成的。所传输的信息要按规定进行编码后才能被电路所接受。

二、VXI 总线

VXIbus 是 VMEbus Extensions for Instrumentation 的缩写，它是 VMEbus 在仪器中的扩展。对于该系统总线的概况可以粗略描述如下：该系统最多可以包含 256 个器件，每个器件都有惟一的地址单元，系统允许有 A、B、C、D 四种尺寸的模块，并把模块插入特制的主机箱内各插槽中，系统组建就像插放和更换书籍一样灵活、方便。对该系统的控制和管理可以通过主机箱外的外部控者或嵌入主机箱的内部控者来实现。

（一）VXI 主机箱

1. VXI 总线模块尺寸

VXI 总线模块尺寸有 4 种标准尺寸：

A 尺寸模块　100 mm×160 mm（高×深）；厚度 200 mm（可扩展若干倍）

B 尺寸模块　233.5 mm×160 mm（高×深）；厚度 200 mm（可扩展若干倍）

C 尺寸模块　233.5 mm×340 mm（高×深）；厚度 300 mm（可扩展若干倍）

D 尺寸模块　366.7 mm×340 mm（高×深）；厚度 300 mm（可扩展若干倍）

A 尺寸模块只有 P_1 连接器，B 尺寸模块和 C 尺寸模块具有 P_1 和 P_2 两种连接器，D 尺寸具有 P_1、P_2 和 P_3 三种连接器。

VXI 总线都被印制在主机箱内的多层背板上，通过 P_1、P_2、P_3 连接器与器件连接。每个连接器都有 96 个引脚，分为 A、B、C 三列，每列 32 个引脚。

2. VXI 总线的构成

VXI 总线共有以下 8 种总线：

（1）VME 计算机总线　规定使用 P_1 连接器的 96 个引线端子和 P_2 连接器中间一列的 32 个引线端子。P_2 连接器两旁的 64 个引线端子和 P_3 连接器的引线端子是由 VXI 总线扩展出来的。包含了数据传输总线、数据传输的仲裁总线、优先级中断总线和公用总线。它支持

32 位数据传输和 16Mbyte 地址寻址。

（2）时钟和同步总线　通过 P_2 连接器提供 10 MHz 时钟，通过 P_3 连接器提供 100 MHz 时钟；P_3 上还有一种同步信号，用来使多个器件对于 100 MHz 时钟的上升沿同步，以便在模块间提供非常准确的时间配合。时钟信号和同步信号都是从 0 号槽模块点对点单独传至其他各槽。

（3）星形总线　处于 P_3 连接器上，提供模块间的异步通信。星形总线连接在各模块插槽和 0 号槽之间，通过程控方式提供任意星形线之间的信号路径。

（4）触发总线　为了适应仪器的触发、定时和消息传递的要求，提供 TTL 和 ECL 触发信号。每条触发线连着各槽的模块，信号在背板的两个端点间逐次传递。

（5）本地总线　提供了相邻模块间的本地通信，得到高传输率。在 P_2 中可达 250 MB/s，P_3 中可达 1 GB/s。

（6）模块识别线　用来检测模块的存在并指示它的物理位置。通过 0 号槽的 P_2 连接器对其余 12 个槽的模块进行识别。

（7）相加总线　用来对模拟信号求和。

（8）电源总线　通过背板向模块提供 7 种电源。

3. VXI 总线系统器件分类

（1）消息基器件　它支持 VXI 总线配置和通信协议，一般是具有通信能力的本地智能器件。如，数字式万用表、频谱分析仪、GPIB-VXI 总线接口器件等。

（2）寄存器基器件　它支持 VXI 总线寄存器分配图，但不支持 VXI 总线的通信协议，一般是简单、便宜的器件。如，简单的开关、数字 I/O 卡、简单的串行接口卡等。

（3）存储器器件　它具有配置寄存器，并包含一定的存储器器件的特征，诸如存储器类型和存取时间等，但不具有 VXI 总线定义的其他寄存器或通信协议，如 RAM 或 ROM 卡。

（4）扩展器件　它允许将来定义更新种类的器件，以支持更高级的兼容性。

（二）0 槽控制器

VXI 总线系统可以包含一个或多个子系统，每个系统最多可以有 13 个模块，其典型系统结构如图 8-5 所示。其中主机箱最左边的插槽为 0 号槽，用于控制 VXI 总线系统的内嵌式控制器及用于连接外部计算机的翻译器和接口都是放置在 0 号槽位置，因此也常称为 0 槽控制器。它还必须有公共系统资源及资源管理的功能，以实现对公共时钟信号、触发信号、模块识别信号、中断优先及中断响应等信号的驱动和管理。

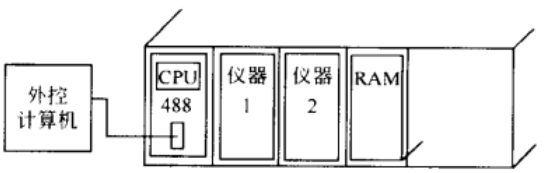


图 8-5　VXI 典型系统结构

一台配备 GPIB 控制功能的计算机可以通过 GPIB-VXI 翻译器就能以控制 GPIB 仪器的方式去控制 VXI 总线仪器。它具有如下功能：将 GPIB 仪器程控代码转换为 VXI 命令，并在 VXI 主机箱内实时执行；通过 GPIB 控制 0 槽资源管理器；完成 GPIB 协议和 VXI 协议间的翻译，用 GPIB 控制 VXI 总线仪器；扩展内置局部命令集，访问 GPIB 或 RS-232 端口。

（三）IEEE-488.2 标准和 SCPI 可程控仪器标准命令

采用 IEEE-488 接口标准实现了硬件标准化，但 IEEE-488 接口标准未解决采用何种语言进行通信或建立某种公共语言环境的问题，使得仪器间的通信协议、语法或数据格式等随

着厂家不同而不同。为了克服通信协议及语法的不兼容性，在 IEEE-488 的基础上产生了 IEEE-488.2 标准。它规定了仪器间的数据交换代码、格式、协议和公式命令，保证了仪器间的通信软件达到了高层次的兼容。因此，IEEE-488.2 标准是自动测试系统中实现通信标准化的一个重要基础标准。

IEEE-488.2 标准定义了 39 条公共命令，但未涉及某些特定仪器提供的测量或信号配置的命令，而这正是 SCPI 所涉及的内容。它是建立在 IEEE-488.2 基础上，仅涉及仪器模块的功能，因而适用于所有的 VXI 总线模块。

三、智能仪器

20 世纪 70 年代以来，随着微处理器的广泛应用，出现了完全突破传统概念的新一代仪器——智能仪器。这类仪器以微处理器为核心，代替常规电子线路，具有信息采集、显示、处理、传输以及优化控制等功能。另外这类仪器一般都配有标准接口，可以参与自动测试系统的组建。智能仪器的组成包括硬件和软件两大部分。

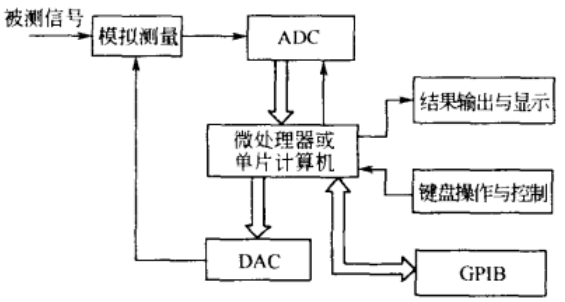


图 8-6　智能仪器的基本组成

（一）智能仪器的硬件组成

其基本框图如图 8-6 所示。

微处理器根据面板键盘设置的状态和数据，按程序存储器（ROM）中的程序控制整机各部分的工作，将仪器采集到的模拟量经 A/D 变换器转变为数字量后，再进行数据处理，最后得到的测量结果可直接送数字显示器或经 D/A 变换器转变成模拟量输出。数据存储器（RAM）用来存储测量数据及运算的中间结果。

（二）智能仪器的软件组成

智能仪器的软件主要分为主程序和子程序。主程序的主要任务是完成仪器的初始化、分析和执行来自键盘及 GPIB 的命令，包括定时中断程序、数据有效中断程序以及 GPIB 中断程序；子程序则具体执行各命令，完成测量及数据处理任务，包括实现 A/D 或 D/A 变换程序、误差处理程序以及数值计算程序等。

（三）智能仪器举例

图 8-7 所示为一智能多用表组成框图。微处理器系统在智能仪器中所起的作用包括两方面，即仪器与外界的通信和仪器内部的工作。仪器通过与外界通信取得有关测量意图以及被测对象的原始信息，经过内部工作处理后，又通过与外界通信而给出测量结果。

（四）智能仪器特点

智能仪器与普通仪器相比具有以下特点。

① 具有面板编程控制能力，仪器可由面板的上功能键和数字键来完成一系列操作。

② 能接受远地编程控制，通过仪器的标准接口及标准母线，用计算机进行远地控制。

③ 整机电路以微处理器为核心，用软件代替一些硬件，将硬件软化，既简化了电路又降低了成本。

④ 具有一定的数据处理能力，如计算、变换、误差修正等。

⑤ 输出显示多样化。

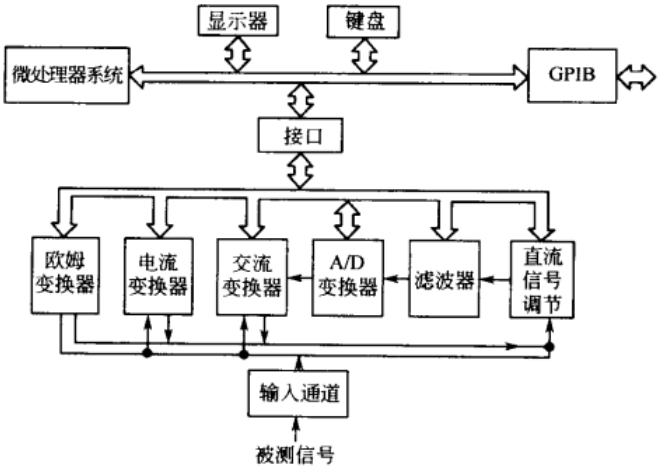


图 8-7　智能多用表实例

第三节　虚 拟 仪 器

一、虚拟仪器基本概念

虚拟仪器概念是为了适应 PC 卡式仪器而提出的。众所周知，传统仪器主要包括三个部分：数据采集与控制、数据分析和数据显示。而 PC 卡式仪器由于自身不带仪器面板，因此必须借助于 PC 机作为其数据分析与显示的工具。利用 PC 机强大的图形环境和在线帮助功能，建立图形化虚拟仪器面板，完成对仪器的控制、数据分析与显示。这种包含实际仪器使用、操作信息的软件与 PC 机结合构成的仪器，就称为虚拟仪器。

由于 PC 机能提供强大的处理功能，因此借助于一台通用的数据采集板，用户就可以通过软件构造几乎任意功能的仪器，“软件就是仪器”是虚拟仪器的内涵。特别是 VXI 总线的系统结构为虚拟仪器的开发提供了更为理想的平台。虚拟仪器的硬件和软件都具有开放性、模块化、可重复使用及互换性等特点，可以更方便、经济地构成自动测试系统。

二、虚拟仪器的结构

（一）虚拟仪器的结构

虚拟仪器将仪器功能划分为一些通用模块，由以下三个主要部分组成。

① 输入——进行信号调理并将输入的被测模拟信号转换成数字信号以便于处理。

② 输出——将量化的数据转换成模拟信号并进行必要的信号调理。

③ 数据处理——通常一个微处理器或数字信号处理器（DSP）就可使仪器按测试要求完成各种处理功能。

将具有一种或多种功能的通用模块组成在一起，就能构成任何一种虚拟仪器。例如，一台频谱分析仪包括一个输入部分和一个数据处理部分。一台任意波形发生器包括输出部分和一个数据处理器。图 8-8 所示的一个虚拟仪器系统中，输入的被测信号经信号调理后，送到 A/D 转换，变为数字信号，再根据测试的需要，用数字信号处理器 DSP 对转换后的数字信

号进行处理，就可得到被测信号的波形、频谱或电压值；如果需产生任意波形，则可利用DSP及适当的算法将所生成的数据送入D/A转换器，再经信号调理产生需要的信号波形。

从示例中可以得出虚拟仪器的体系结构，如图8-9所示。

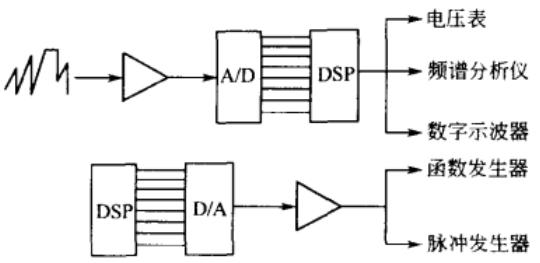


图8-8　虚拟仪器实例

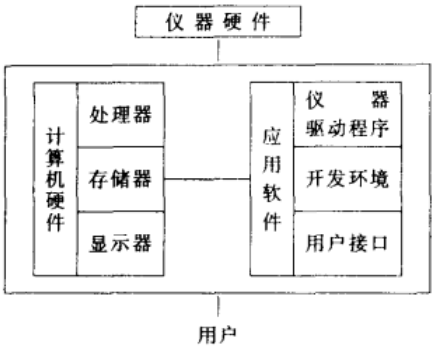


图8-9　虚拟仪器的基本结构

虚拟仪器的硬件由两部分组成，一部分是计算机硬件，一部分是仪器硬件。仪器硬件与计算机硬件一起工作，用来采集数据、提供源信号和控制信号，例如数据采集卡、电压表、示波器、函数信号发生器等。虚拟仪器通过透明的计算机硬件和仪器硬件资源，由软件组合在一起构成任何一种用户需要的仪器。

（二）虚拟仪器的关键技术

VXI总线非常适合上述任务，其本地总线可作为相邻模块间的专用通信路径，同时严格控制模块的触发和同步以保持高性能。此外还严格规定了各模块电磁兼容的要求，为良好的线性和动态范围的ADC和DAC模块性能发挥提供了极好的环境。除此之外，各种总线协议和软件包允许这种数据传输对用户是透明的。

在虚拟仪器中，数字信号处理（DSP）是十分重要的，它可提高测量的重复性和稳定性，它以算法为基础而实现多种功能。同时DSP也是构成时域测量与频域测量的桥梁，可方便地进行时域到频域的转换。

三、虚拟仪器的软件结构

如图8-10所示，对VXI总线而言的虚拟仪器软件主要包括三部分。

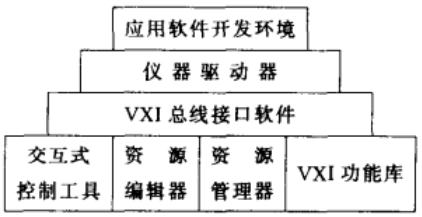


图8-10　虚拟仪器软件结构

1．VXI总线接口软件

它是实现VXI总线虚拟仪器最基础的软件。

① 资源管理软件执行VXI总线特性、系统的初始化与组态；

② 在建立仪器过程中，用户通过资源编辑器使资源管理器组态VXI总线系统；

③ 交互式控制工具使用户能够交互监控VXI总线背板和器件，并在开发过程中通过它调试VXI总线系统；

④ VXI总线功能库涉及到VXI总线的低层通信协议，为用户控制VXI总线系统提供多种功能调用。

2．仪器驱动器

它是完成对某一特定仪器的控制与通信的软件程序，是用户软件的一部分，是VXI总

线虚拟仪器的核心。其包括以下内容。

（1）操作接口　提供了一个虚拟仪器面板，用户通过对该面板控制完成对仪器的操作；

（2）编程接口　能将仪器虚拟面板的相应操作转换成仪器的代码，以实现对仪器驱动的功能调用。

（3）I/O 接口　提供了仪器驱动器与仪器的通信能力；

（4）功能库　描述了仪器驱动器所能完成的测试功能；

（5）子程序接口　使得仪器驱动器在运行时能调用它所需要的软件模块。

3．应用软件开发环境

它将计算机的数据分析和显示能力与仪器驱动器融合在一起，为用户开发虚拟仪器提供了必须的软件工具与环境。目前，有两类虚拟仪器的开始环境，一类是传统编程语言，如 LabWindows；另一类是图形编程语言，如 LabVIEW。

本　章　小　结

1．自动测试系统的发展过程分为三代。其中第二代自动测试系统是基于 GPIB 构建的。

2．GPIB 基本性能以及 GPIB 的接口三要素。

3．GPIB 系统中器件功能主要分为三种：控者、讲者和听者。GPIB 中的消息分为接口消息和仪器消息。GPIB 的总线基本组成分为：数据总线、挂钩线和管理总线。

4．基于 GPIB 的系统中，信息的传递是利用三线挂钩技术。

5．第三代自动测试系统是基于 VXI 总线构建的。软件是整个仪器的关键。VXI 系统仪器模块有：消息器件、寄存器器件、存储器器件和扩展器件。采用 IEEE-488.2 规范。

6．智能仪器是利用微处理器来进行控制的，由软件和硬件构成，带有 GPIB 接口的智能仪器可构成自动测试系统。

7．“软件就是仪器”是虚拟仪器的内涵。虚拟仪器的硬件由计算机硬件和仪器硬件构成；软件由 VXI 总线接口软件、仪器驱动器和应用软件开发环境构成。数据字信号处理（DSP）是虚拟仪器的重要组成部分。



思考题与习题

8-1　第二代自动测试系统有何特点？

8-2　GPIB 总线是如何定义的？其基本结构如何？

8-3　试述 GPIB 中三线挂钩传送数据的过程。

8-4　VXI 总线的含义是什么？它包括哪 8 种总线？

8-5　VXI 总线中 0 槽控制器有何作用？

8-6　智能仪器的基本概念是什么？微处理器在仪器内部起什么作用？

8-7　试说明虚拟仪器的基本概念并给出其基本结构。

8-8　虚拟仪器的仪器驱动器应具备哪些功能？

8-9　试述虚拟仪器与 VXI 系统的关系。

附录　综合实训参考方案

AM 中波收音机部分指标的测试和调整

一、实训目的

了解信号发生器、电压表、示波器等仪器在调试过程中的应用。

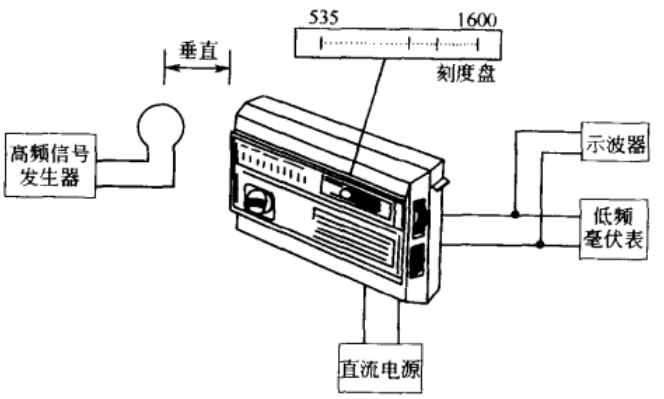
二、实训设备

高频信号发生器（如 XFG-7 型）、低频电压表（如 GB-90 型）、示波器（带宽包含低频即可）、直流稳压电源、AM 中波收音机。

三、实训内容

1．设备连接

收音机在生产过程中或者发生故障修理后，要对有关指标进行测试，必要时进行调整。AM 中波收音机在调试时与仪器连接如附图所示。图中毫伏表和示波器并接在喇叭两端，用于监测收音机的输出电压和波形。高频信号发生器输出端接一环形天线，并使环形天线的平面垂直靠近收音机的磁棒，其距离以收音机能接收到信号为准。



附图　收音机调试连接图

2．调整中频频率

超外差式收音机能将不同频率的高频输入信号变换成固定的中频，即收音机各个中频变压器（中周）应正确的调准在这个中频频率上。否则，收音机的灵敏度、选择性等主要技术性能均无法得到保证。中国收音机的中频频率规定为 465 kHz。

① 将本机振荡器中的可变电容短路，使本机振荡停振以避免干扰；音量调至最大。

② 将高频信号发生器的输出频率调到 465 kHz，调幅度为 30%（调制信号频率为1 kHz），输出电压控制在使收音机的输出电压在 300 mV 以内。

③ 用无感螺丝刀调节收音机的中周磁帽，由后级向前级依次反复调整，使收音机的输出电压最大。注意在此过程中应不断调小高频信号发生器的输出电压，使收音机的输出电压控制在 300 mV 以内。

④ 将高频信号发生器的输出频率连续偏离 ± 10 kHz（以 465 kHz 为中心），收音机的输出电压应基本对称，否则应重新调整。

3. 调整波段频率范围

① 拆去可变电容上的短路线。

② 调节高频信号发生器使输出频率为 520 kHz（调幅度、输出电压同上），调节收音机调谐旋钮至频率最低端，这时收音机能接收到高频信号发生器的输出信号，否则应调节收音机本振线圈的磁帽。再改变高频信号发生器的输出频率为 1640 kHz，调节收音机调谐旋钮至频率最高端，收音机同样应能接收到高频信号发生器的输出信号，否则应调节收音机本振回路中的微调电容。

③ 上述过程重复几遍，直到符合要求为止。

参 考 文 献

1 赵中义等. 示波器原理、检修与检定. 北京：电子工业出版社，1990

2 刘明晶. 通用电子测量仪器. 北京：航空工业出版社，1989

3 阮德生. 自动测试技术与计算机仪器系统设计. 西安：西安电子科技大学出版社，1997

4 张世箕. 智能仪器. 北京：电子工业出版社，1985

5 陈光禋. VXI总线测试平台技术. 成都：电子科技大学出版社，1996

6 陈光禋. 现代电子测试技术. 北京：国防工业出版社，2000

7 张乃国. 电子测量技术. 北京：人民邮电出版社，1985

8 蒋焕文. 孙续. 电子测量. 第二版. 北京：中国计量出版社，1988

9 陆玉新. 傅崇伦. 电子测量. 北京：国防工业出版社，1985

10 朱文华. 电子测量与仪器. 南京：东南大学出版社，1994

11 申业纲. 电子测量. 南京：江苏科技出版社，1986

12 孙树藩. 常用电子仪器原理与应用. 北京：中国计量出版社，1997